

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O₃ 浓度变化 王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何镓祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)

电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)

广西玉林市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征 张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)

大气环境分区管理: 以广东省为例 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例 温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁潇蕾, 苗松 (57)

基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ¹⁵N 和 δ¹⁸O 模拟 王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价 张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响 王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险 姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响 卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)

K₂S₂O₈ 强化 g-C₃N₄ 薄膜光电催化降解 Cu(CN)₂ 并同步回收 Cu 党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)

氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能 马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除 曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响 任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征 赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响 许雯佳, 戚小英 (202)

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)

AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟 曹特特, 王林, 李咏梅 (219)

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)

碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)

容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)

DNBF-O₃-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响 周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)

高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用 韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)

去除城市生活污水中有机络合态金属强化其厌氧生物制气 卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价 王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH₄ 和 N₂O 通量日变化特征 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)

3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)

有机替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N₂O 排放的影响 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³C-CO₂ 脉冲标记 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)

基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测 曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响 封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)

典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征 张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响 代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响 王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较 张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈焯, 付璐璐, 王勋功 (438)

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系 袁丽娟, 廖且根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征 张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响 章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响

吕亮^{1,2}, 尤雯^{1,2}, 韦佳敏^{1,2}, 吴鹏^{1,2,3}, 沈耀良^{1,2,3*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 采用连续流 ABR-MBR 组合工艺处理生活污水, 研究不同容积负荷 (volume loading rate, VLR) 对该工艺反硝化除磷性能的影响, 获得最佳工艺参数. 试验考察 ABR 进水容积负荷 (以 COD 计, 下同) 分别为 0.76、1.01、1.51 和 2.27 kg·(m³·d)⁻¹ 时系统去碳脱氮除磷的性能, 并在各 ABR 容积负荷条件下考察 MBR 容积负荷对 MBR 反应器硝化性能的影响. 结果表明, 在 ABR 进水容积负荷为 1.51 kg·(m³·d)⁻¹ 的条件下, 系统 A2 隔室 COD 去除量最大, 并在 MBR 容积负荷为 0.462 kg·(m³·d)⁻¹ 时, MBR 反应器中实现了短程硝化, 系统 NH₄⁺-N 和 TN 去除率分别达到 90% 和 72% 以上, 厌氧释磷量为 7.41 mg·L⁻¹, 缺氧吸磷量达到 15.42 mg·L⁻¹, 出水 PO₄³⁻-P 浓度低于 0.5 mg·L⁻¹, 这表明短程硝化更有利于强化 ABR-MBR 系统的反硝化除磷性能.

关键词: ABR-MBR 组合工艺; 容积负荷; 短程硝化; 生活污水; 反硝化除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0239-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201707072

Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process

LÜ Liang^{1,2}, YOU Wen^{1,2}, WEI Jia-min^{1,2}, WU Peng^{1,2,3}, SHEN Yao-liang^{1,2,3*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China; 3. Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China)

Abstract: The effect of volume loading rate (VLR) on denitrifying phosphorus removal was investigated in a continuous-flow ABR-MBR combined process treating domestic wastewater to arrive at optimum process parameters. In the experiment, the VLR of the ABR was set at 0.76, 1.01, 1.51, and 2.27 kg·(m³·d)⁻¹. The removal of carbon, nitrogen, and phosphorus in the system and the effect of the VLR in the MBR on nitrification performance were observed for each VLR of the ABR. The results showed that under the condition when the VLR of the ABR was 1.51 kg·(m³·d)⁻¹, the amount of COD removal in the A2 chamber was the largest, and shortcut nitrification was achieved in the MBR when the VLR of the MBR was 1.51 kg·(m³·d)⁻¹. Meanwhile, the removal efficiency of NH₄⁺-N and TN reached more than 90% and 72%, respectively, the anaerobic P-release and anoxic P-uptake were 7.41 mg·L⁻¹ and 15.42 mg·L⁻¹, respectively, and the concentration of PO₄³⁻-P in effluent was lower than 0.5 mg·L⁻¹, which indicated that the shortcut nitrification was more conducive to strengthening the performance of denitrifying phosphorus removal in the ABR-MBR system.

Key words: ABR-MBR combined process; volume loading rate (VLR); shortcut nitrification; domestic wastewater; denitrifying phosphorus removal

厌氧折流板反应器 (ABR) 多应用于高浓度污水的处理, 但有研究表明, ABR 反应器与其它反应器联合处理低浓度生活污水也能取得较好的处理效果^[1]. ABR 反应器不仅可实现微生物相的有效分离, 亦可实现对底物不同阶段和不同程度的转化^[2], 为系统后续除磷提供 VFA 等优质碳源. 近年来, 膜生物反应器 (MBR) 凭借其高效的生物截留作用及泥龄 (SRT) 与水力停留时间 (HRT) 完全分离的优势, 并随着制膜成本和运转费用的下降而被日趋广泛地得到应用^[3~6].

不同的 HRT 对脱氮除磷效果有较明显的差别^[7, 8], 其中厌氧停留时间的长短直接影响 COD 的降解以及磷酸盐的释放^[9], 过长容易产生污泥膨

胀, 过短会减小释磷量; 好氧停留时间的长短则会影响硝化性能, 过长导致氨氮完全转化为硝态氮, 过短致使氨氮去除不完全. HRT 又是污水处理反应器设计和运行控制中最为关键且可以人为调控的部分, 因此探讨 HRT 对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响对于提升工艺运行效果, 确定最适工艺参数具有重大意义.

收稿日期: 2017-07-05; 修订日期: 2017-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578353); 江苏省自然科学基金项目 (BK20160356); 江苏省高校自然科学基金项目 (16KJB610013); 苏州科技学院科研基金青年项目 (XKQ201504)

作者简介: 吕亮 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: lvliangniu@outlook.com

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

本研究以生活污水为研究对象,采用前期研究构建并取得良好脱氮除磷效果^[10-12]的 ABR-MBR 协同组合工艺,考察通过调控 HRT 获得的不同容积负荷对其反硝化除磷性能的影响,以期为低碳源实际生活污水的连续流处理提供一种高效节能稳定的运行方式。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

ABR-MBR 工艺试验装置如图 1。本研究采用的 ABR-MBR 一体化反应器由 4 隔室 ABR 反应器和好氧 MBR 反应器组成,均采用有机玻璃制成,总有效容积为 10.8 L,ABR 反应器和好氧 MBR 反应器的有效容积分别为 7.2 L 和 3.6 L。ABR 第 1、2 隔室为厌氧区,第 3、4 隔室为缺氧区,MBR 为好氧区。MBR 反应器采用间歇抽吸出水,抽吸周期为 10 min(8 min 出水/2 min 反冲洗),底部采用微孔曝气供氧。膜组件采用 PVDF 柱状式中空纤维膜,膜孔径为 0.2 μm ,采用真空压力表测定跨膜压差(TMP)以反映膜的污染情况,一旦 $\text{TMP} \geq 30 \text{ kPa}$,则对膜组件进行化学清洗。

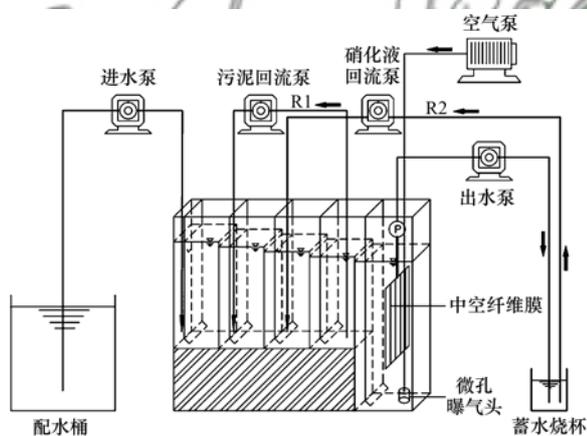


图 1 ABR-MBR 工艺试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the ABR-MBR setup

试验用污水全部进入厌氧区。ABR-MBR 工艺为实现短程反硝化除磷设置两个回流。一是污泥回流:ABR 第 4 隔室污泥回流至 ABR 第 2 隔室,旨在利用优质碳源释磷,其回流比为 R1;二是硝化液回流:MBR 硝化液回流至 ABR 第 3 隔室,为其创造缺氧环境而实现缺氧吸磷,其回流比为 R2。试验期间,进出水、污泥回流和硝化液回流的流量调节均由蠕动泵控制。系统采用可编程逻辑控制器(PLC)对水位进行恒定以及实现进出水泵和反冲洗泵的启闭自动控制。

1.2 试验用水和污泥

试验用水为生活污水:人工配水 = 1:1 的模拟生活污水,生活污水取自苏州市某高校实际生活污水,各项水质指标见表 1 所列。采用葡萄糖、淀粉和蛋白胨和氯化铵和磷酸二氢钾适当补充、调节碳源和氮、磷。接种污泥取自某城市污水处理厂的二沉池及 A²/O 好氧池污泥,二沉池污泥中几乎不含亚硝酸盐及硝酸盐,且有较好的脱氮除磷性能。好氧池污泥属全程硝化污泥,硝化性能良好。ABR 反应器各隔室接种污泥 MLSS 约为 28 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,MBR 反应器内接种污泥 MLSS 约为 4 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 1 原水水质

Table 1 Characteristics of the raw wastewater

水质指标	范围	均值
$\text{COD}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	292.4 ~ 431.8	377.8
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	47.3 ~ 59.5	54.5
$\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0 ~ 0.01	0.004
$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.05 ~ 1.2	0.5
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6.7 ~ 9.4	8.1
pH	7.1 ~ 7.3	7.2

1.3 分析测定方法

水样经 0.45 μm 中性滤纸过滤后按照标准方法^[13]测定 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 。试验中检测项目及其分析方法详见表 2。

表 2 检测项目分析方法

Table 2 Test materials and analytical methods for water quality

检测项目	分析方法	检测项目	分析方法
COD	快速消解法	MLSS	重量法
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	纳氏试剂光度法	SV%	30 min 沉降法
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法	pH	便携式 pH 计
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	紫外分光光度法	DO	便携式 DO 测定仪
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	钼锑抗分光光度法	温度	温度计

1.4 试验方案

试验分为 5 个阶段,反应器在各个阶段的运行参数如表 3 所示。每个工况均在系统稳定运行后进行采样分析。整个试验过程对反应器进行水浴加

热,但冬季反应器内水温由于室温较低维持在(25 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$,夏季反应器内水温则维持较高温在(30 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$ 。好氧区采用低氧曝气方式运行,试验期间 DO 稳定控制在 0.3 ~ 1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 3 不同容积负荷对 ABR-MBR 工艺脱氮除磷影响研究的试验方案

Table 3 Experimental scheme for the study of the effect of the VLR on nitrogen and phosphorus removal by the ABR-MBR process

试验阶段	工况	HRT/h		容积负荷(以 COD 计)/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$		温度/ $^{\circ}\text{C}$	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
		ABR	MBR	ABR	MBR		
I	A (1 ~ 39 d)	12	6	0.76	0.187	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
	B (40 ~ 55 d)	12	6	0.76	0.187	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
II	C (56 ~ 77 d)	12	5	0.76	0.225	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
	D (78 ~ 104 d)	12	4	0.76	0.316	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
III	E (105 ~ 117 d)	9	6	1.01	0.219	25 ± 2	0.3 ~ 0.7
	F (118 ~ 129 d)	9	5	1.01	0.298	25 ± 2	0.3 ~ 0.7
	G (130 ~ 141 d)	9	3	1.01	0.376	25 ± 2	0.3 ~ 0.7
IV	H (142 ~ 157 d)	6	3	1.51	0.462	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	I (158 ~ 171 d)	6	4	1.51	0.292	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	J (172 ~ 181 d)	6	5	1.51	0.257	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
V	K (182 ~ 191 d)	4	5	2.27	0.275	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	L (192 ~ 201 d)	4	4	2.27	0.330	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	M (201 ~ 211 d)	4	3	2.27	0.451	30 ± 2	0.3 ~ 0.7

2 结果与讨论

2.1 容积负荷对有机物降解的影响

本研究通过改变 ABR 反应器的 HRT 来改变其进水容积负荷,本试验将 ABR 反应器的 HRT 分别控制在 12、9、6 和 4 h 这 4 个阶段,相对应的进水容积负荷(以 COD 计)分别为 0.76、1.01、1.51 和 $2.27 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。如图 2 所示,试验 4 个阶段进水 COD 平均浓度分别为 382.96、376.31、387.57

和 $362.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统出水 COD 平均浓度分别为 30.7、35.0、37.3 和 $40.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统对 COD 的总平均去除率分别为 92%、90.7%、90.4% 和 88.7%。可以看出,随着进水容积负荷的逐步增大,系统出水 COD 平均浓度呈逐渐上升的趋势,去除率也逐渐下降,但趋势并不明显,而且出水 COD 浓度均能达到国家一级 A 排放标准。由此可见,不同的进水容积负荷对于本研究的 ABR-MBR 系统的 COD 总体去除影响不大。

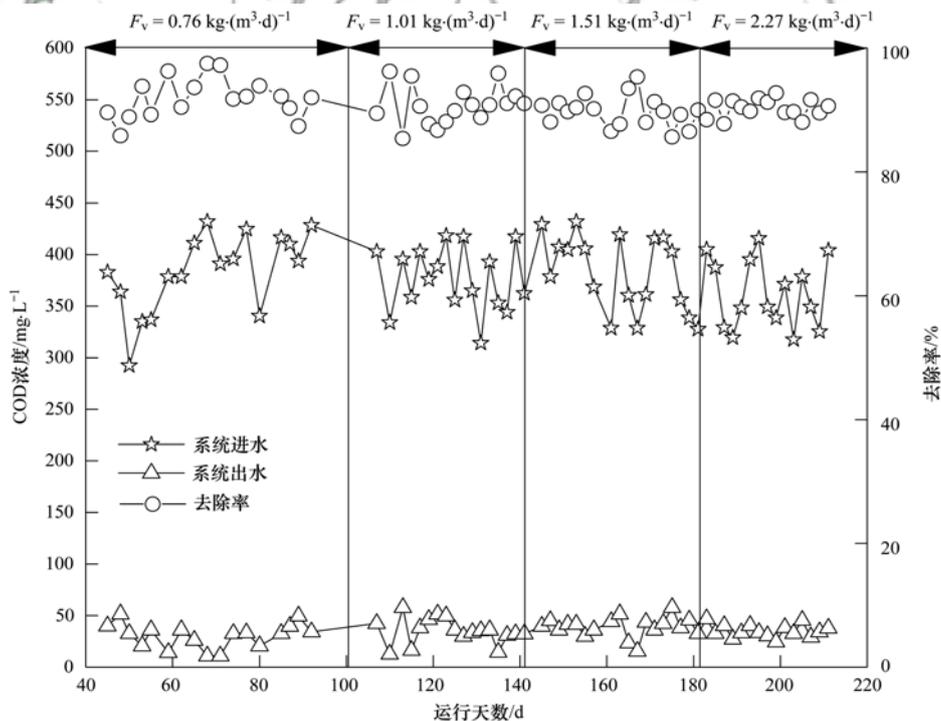


图 2 不同容积负荷对 COD 的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of COD at different VLRs

虽然容积负荷对系统总体的 COD 去除只有微弱影响,但对 ABR 反应器各隔室的 COD 去除影响不容忽视,去除情况见图 3. 从中可以看出,COD 的降解主要集中在厌氧区,A1 隔室为厌氧水解区,在 A2 隔室中,由于污泥和硝化液回流的影响会存在少量的 NO_x^- -N,系统中部分反硝化菌会优先利用一小部分 COD 为电子供体进行反硝化作用以去除这部分 NO_x^- -N,其余大部分 COD 被 DPB 利用作为其电子供体来合成自身储能物质(PHB),同时将细胞内的有机磷转化为无机磷释放于水体中^[14]. 在系统缺氧区(A3 和 A4),有少部分 COD 进一步被去除,主要是由于硝化液回流至缺氧区,系统中的反硝化菌同样会优先利用 NO_x^- -N 为电子受体,以这部分 COD 为电子供体进行反硝化作用. 另外,MBR 反应器中也存在部分异氧菌会消耗部分 COD 以供自身的新陈代谢,这也是 MBR 中少量 COD 去除的原因所在.

由图 3 可知,当负荷为 $0.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,A1 隔室承担了绝大部分 COD 的去除,仅 A1 隔室去除率便达到 72.6%,而随着容积负荷增至 $1.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,COD 的去除从主要由 A1 隔室承担逐渐向 A2 隔室推移. 当容积负荷继续增大至 $2.27 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,A1、A2 隔室 COD 去除量较之前均有所下降,两个隔室对 COD 的去除率仅为 67.4%,A3、A4 隔室 COD 的去除量有所上升,表明 COD 的去除已经开始向 A3 隔室转移了. 这主要是因为低容积负荷使得底物基质与污泥得以充分有效地接触,达到高效的有机物降解效率,但随容积负荷的升高,水力扰动逐渐增大,废水在 A1 隔室的停留时间缩短,同时反应器的水力流态逐渐变差,A1 隔室的有机底物还未来得及与污泥充分反应即被推流至后续隔室^[15],由后续隔室进一步降解,这也使得 VFA 峰值所处点位发生同步向后推移. 另外,A1 隔室中的颗粒污泥粒径随着容积负荷的增大而逐渐变小,这是由于容积负荷从 $0.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 变化至 $2.27 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,ABR 反应器中污水的上升流速从 $0.8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 升高到 $2.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$,从而逐渐增大的水力剪切对颗粒污泥造成破坏导致粒径变小^[16-18].

2.2 容积负荷对脱氮的影响

对于 ABR-MBR 组合工艺,MBR 的容积负荷既影响出水 NH_4^+ -N 浓度,也对 NH_4^+ -N 氧化产物 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度有重要影响,而这部分氧化产物又是反硝化除磷中不可或缺的 DPB 电子受体.

MBR 容积负荷对 NH_4^+ -N 的去除效果如图 4 所

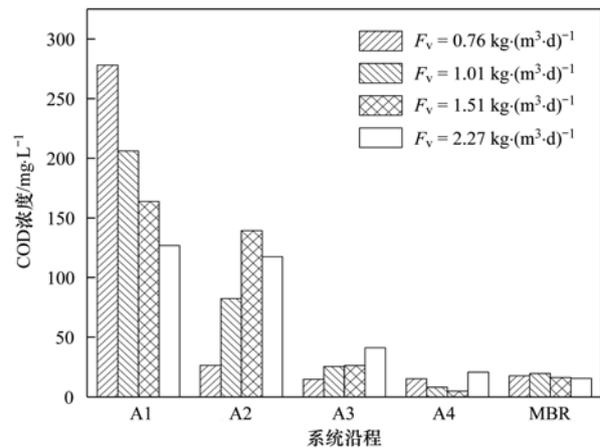


图 3 不同容积负荷下各隔室 COD 去除情况

Fig. 3 Removal of COD along the reactor at different VLRs

示. 从中可见,在本研究中,MBR 容积负荷对 NH_4^+ -N 的去除有显著的影响. 从中还可以看出,MBR 容积负荷对 NH_4^+ -N 的去除效果不会随着 ABR 容积负荷的改变而改变,MBR 反应器内 NH_4^+ -N 的去除率均是随着 MBR 容积负荷的增大而呈下降趋势,但去除率均维持在 90% 以上,且出水 NH_4^+ -N 浓度均在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,始终能够稳定达到国家一级 A 排放标准.

由图 4(a) 和 4(b) 可见, NH_4^+ -N 去除率波动较大,说明 MBR 中 NH_4^+ -N 的去除率受 MBR 容积负荷的影响较为明显,硝化性能暂不稳定,硝化效率随 MBR 容积负荷的升高而下降. 而从图 4(c) 和 4(d) 可以看出, NH_4^+ -N 的去除率波动较前两个阶段有所减小,说明在系统经过长时间的运行后,MBR 中的硝化菌已经逐渐适应了容积负荷的变化对其的冲击,去除效果趋于稳定.

Castignetti 等^[19] 提出了兼具异养硝化和反硝化能力的细菌的存在. 因此,在好氧条件下,硝化菌和反硝化菌可以同时进行硝化和反硝化作用^[20]. 本研究中,MBR 反应器内发生了 TN 的去除,足以说明在 MBR 反应器中存在好氧反硝化菌.

从图 5(a) 可以看出,随着容积负荷的增大,TN 去除率逐渐升高. 这是因为 MBR 进水 NO_3^- -N 浓度增大,MBR 中又有充足的碳源以供好氧反硝化菌进行好氧反硝化作用. 由图 5(c) 可知,MBR 容积负荷与 TN 去除率呈负相关,与图 5(a) 的趋势完全相反. 一方面是由于容积负荷越大,硝化时间越短,硝化作用越不完全,TN 去除率也就越低;另一方面,容积负荷的增大使得好氧反硝化菌没有充足的时间生长代谢,从而数量明显减少,导致 TN 去除率下降. 图

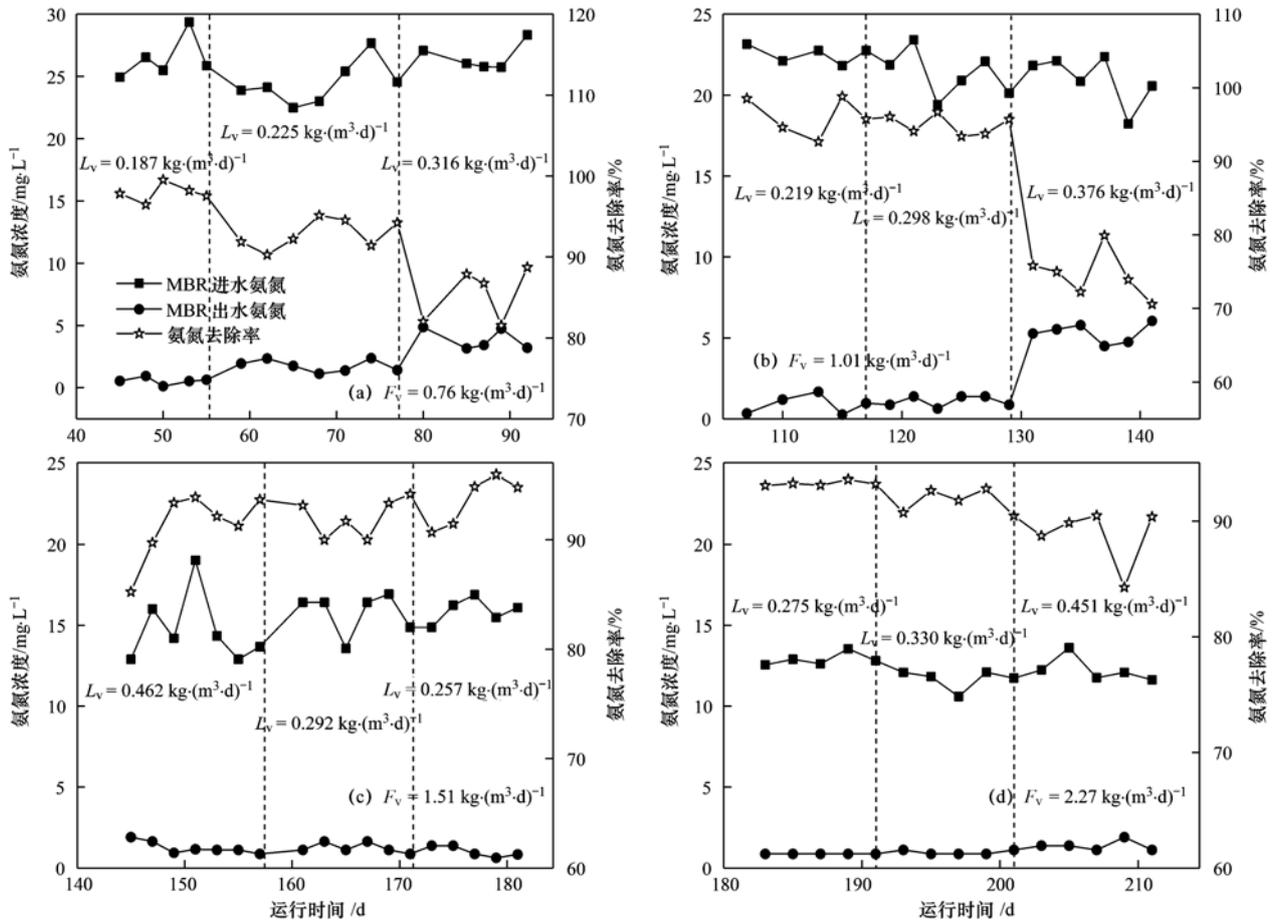


图4 不同容积负荷下对氨氮的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of NH_4^+-N at different VLRs

5(b) TN 去除率趋势介于图 5(a) 和 5(c) 之间, 说明随着容积负荷的增大, TN 去除率开始出现下降的趋势. 而图 5(d) 中 TN 去除率基本维持在 18% 左右, 表明其不随容积负荷的改变而改变, 这是由于在系统经过长时间的运行过后, MBR 中的硝化菌和反硝化菌已经逐渐适应了容积负荷的变化对其的冲击, TN 去除效果已趋于稳定.

2.3 容积负荷对厌氧释磷碳源利用的影响

污水在厌氧区的停留时间的长短决定着 COD 的降解程度, COD 的去除量又与释磷量密切相关, 而释磷效果的好坏又影响着缺氧吸磷的效果, 从而会对系统除磷效果造成影响. 不同容积负荷条件下 A2 隔室 COD 的去除情况与释磷情况如图 6 所示.

从图 6 中可以看出, 当容积负荷从 $0.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 增至 $1.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, A2 隔室 COD 的去除量随之从 $26.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $139.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此时, A2 隔室释磷量也逐渐增大, 从 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这是因为在一定范围内随着容积负荷的增大, A2 隔室的 VFA 数量增多, 从

而 DPB 能充分吸收 VFA 来合成 PHB 并释放磷. 但是, 当容积负荷继续增大至 $2.27 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, A2 隔室去除的 COD 有所减少, 但释磷量依然有增无减. 这是由于 VFA 峰值所处点位随容积负荷的增大而向后续隔室推移, 使得 A2 隔室 VFA 浓度有所降低, 而当 A2 隔室 VFA 被消耗完全后, DPB 无法继续吸收 VFA 合成 PHB, 但微生物为维持基本的生命代谢活动, 仍需不断地将细胞内的有机磷转化为无机磷而释放以合成 ATP, 这就导致在 A2 隔室中发生了无效释磷^[21].

2.4 容积负荷对缺氧吸磷氮素利用的影响

各个工况下缺氧段吸磷量和出水 N、P 浓度变化情况如图 7. 从中可以看出, 当容积负荷从 $0.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 增至 $1.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 缺氧段吸磷量逐步升高, 平均从 $8.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $14.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 缺氧出水 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度也相应地逐渐降低, 平均从 $2.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 缺氧吸磷量增大的趋势与厌氧释磷量逐步增大的趋势(见图 6)相一致, 这也进一步说明了在一定容积负荷范围

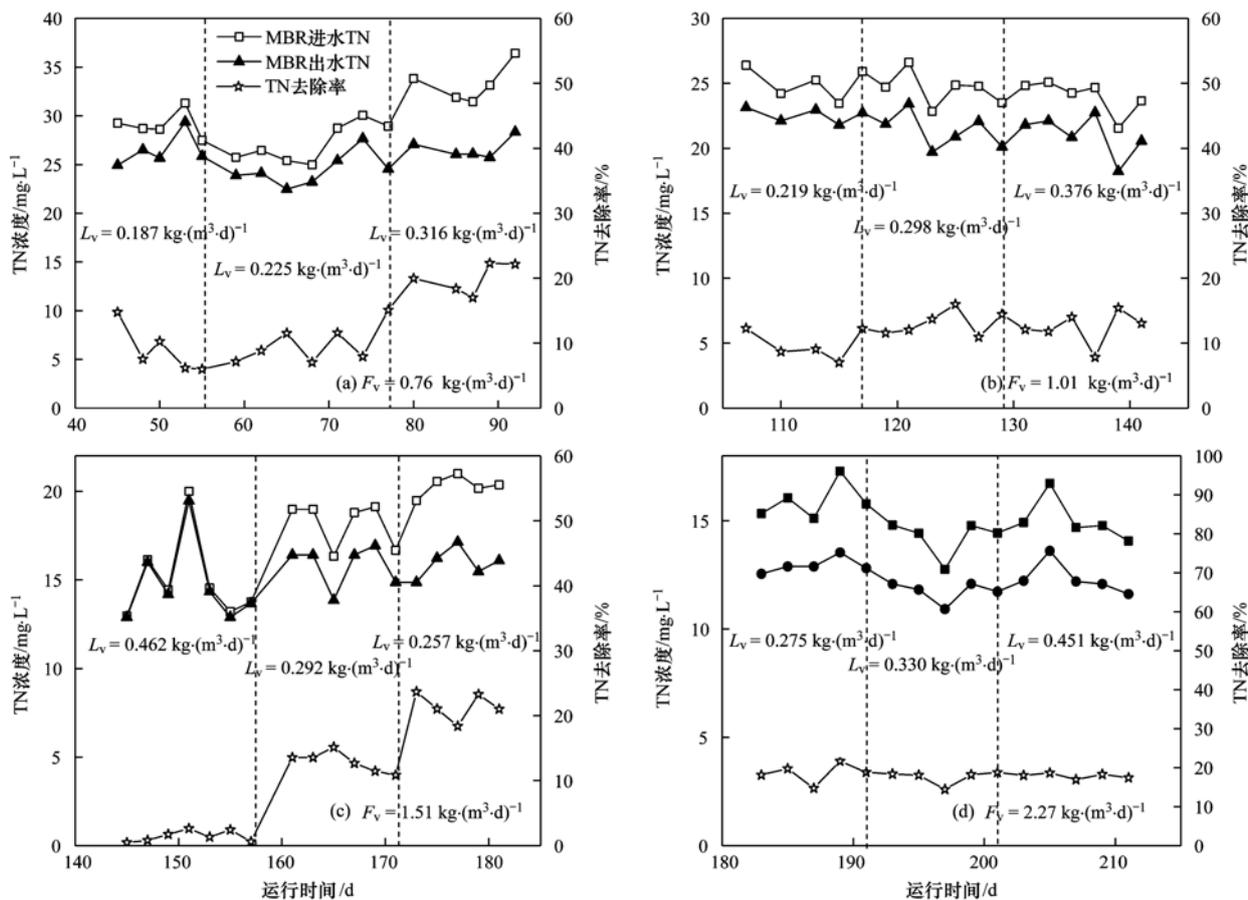


图5 不同容积负荷下对 MBR 的 TN 去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of TN in the MBR at different VLRs

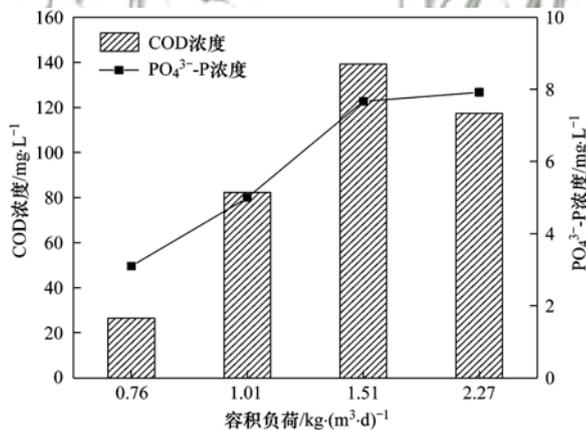


图6 不同容积负荷下 A2 隔室 COD 去除情况及释磷情况

Fig. 6 Removal of COD and phosphorus release in chamber A2 at different VLRs

内,缺氧吸磷的效果取决于厌氧释磷的效果. 当容积负荷为 $2.27 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,虽然由图 6 可知,厌氧释磷量继续升高,但缺氧吸磷量并未随之升高,而是有所减少,这说明在此容积负荷下,厌氧释磷的多少不是影响缺氧吸磷效果的主要因素. 本研究中,缺氧吸磷量的减少导致系统除磷性能的恶化主

要是因为短程硝化的破坏使得电子受体 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度有所降低,致使缺氧反硝化吸磷不充分,最终导致出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度过高而不达标. 因此,当容积负荷超过一定范围后, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度的高低成为了反硝化除磷性能好坏的主要制约因素. 另外, C/P 比偏低也是造成吸磷效率差的重要原因.

另外,由图 7 可知,缺氧段出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度均低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度整体高于出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度,这说明了在本系统中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 未对 DPB 产生抑制作用且成功实现了以 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 为电子受体的反硝化除磷. 这与 Zhang 等^[22] 利用 MUCT-MBR 工艺成功实现以 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 为电子受体的反硝化除磷的试验结果相一致. 在容积负荷为 $1.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的工况 g (实现短程硝化) 条件下,缺氧段出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度几乎为零,且 TN 浓度较其它工况均低,缺氧段出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较其它工况为最低,仅为 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,表明短程硝化更有利于 ABR-MBR 系统处理连续流实际生活污水实现反硝化除磷.

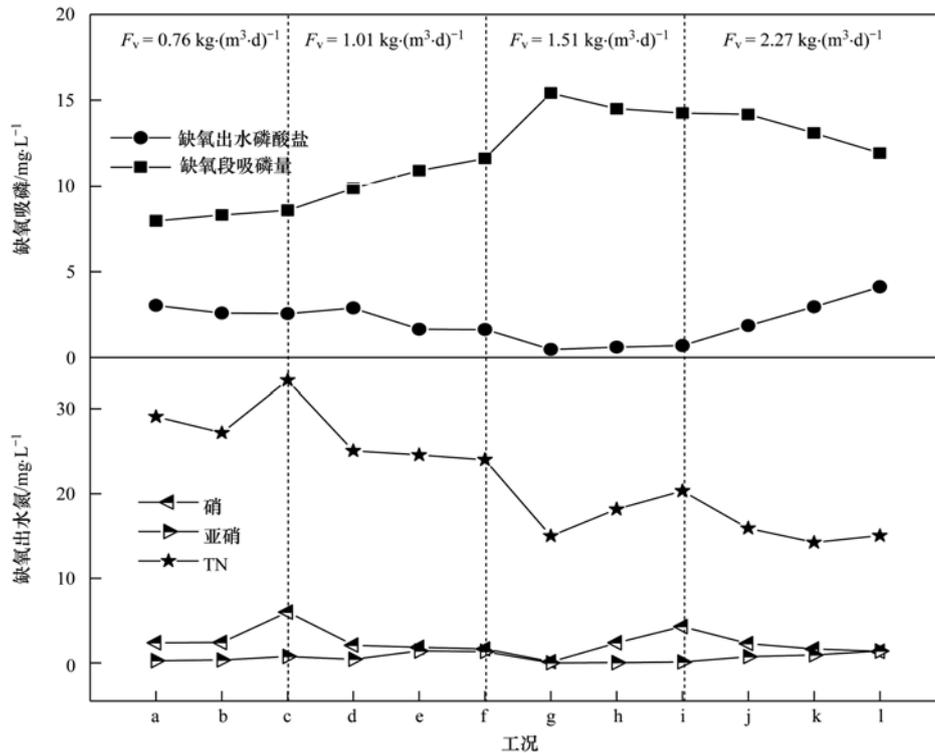


图7 不同容积负荷缺氧段吸磷量和出水 N、P 浓度变化情况

Fig. 7 P-uptake and variations of N&P concentrations in the effluent of the anoxic zone at different VLRs

3 结论

(1) 容积负荷对系统总体的 COD 去除只有微弱影响,出水 COD 浓度均能达到国家一级 A 排放标准,但对 ABR 反应器各隔室的 COD 去除影响不容忽视,COD 的降解会随着容积负荷的增大而向后续隔室进行推移。

(2) 系统 NH_4^+ -N 去除率均维持在 90% 以上,且出水 NH_4^+ -N 浓度均在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。系统 TN 去除率随着容积负荷的增大逐渐升高,MBR 反应器内亦发生了 TN 的去除,推测在 MBR 反应器中存在好氧反硝化菌。在最优 ABR 进水容积负荷 [$1.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] 下,厌氧释磷量为 $7.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,缺氧吸磷量为 $15.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 PO_4^{3-} -P 浓度低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(3) 在一定容积负荷范围内,缺氧吸磷的效果取决于厌氧释磷的效果,而当容积负荷超过一定范围后, NO_2^- -N 浓度的高低成为了反硝化除磷性能好坏的主要制约因素,且短程硝化更有利于 ABR-MBR 系统处理连续流实际生活污水实现反硝化除磷。

参考文献:

[1] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术: 理论与应用[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
Shen Y L, Wang B Z. New technologies for biological wastewater

treatment: theory and application (2nd ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.

- [2] 沈耀良, 吴鹏, 王建芳, 等. 厌氧折流板反应器处理低浓度污水的研究与应用现状[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2015, 28(2): 1-10.
Shen Y L, Wu P, Wang J F, *et al.* State-of-the-art of anaerobic baffled reactor treating low-strength sewage [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2015, 28(2): 1-10.
- [3] Brown P, Ong S K, Lee Y W. Influence of anoxic and anaerobic hydraulic retention time on biological nitrogen and phosphorus removal in a membrane bioreactor[J]. Desalination, 2011, 270(1-3): 227-232.
- [4] Farizoglu B, Keskinler B, Yildiz E, *et al.* Simultaneous removal of C, N, P from cheese whey by jet loop membrane bioreactor (JLMBR)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 146(1-2): 399-407.
- [5] Chae S R, Shin H S. Effect of condensate of food waste (CFW) on nutrient removal and behaviours of intercellular materials in a vertical submerged membrane bioreactor (VSMBR) [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(2): 373-379.
- [6] Kim H S, Choung Y K, Ahn S, *et al.* Enhancing nitrogen removal of piggery wastewater by membrane bioreactor combined with nitrification reactor[J]. Desalination, 2008, 223(1-3): 194-204.
- [7] 李红岩, 张显, 高峰, 等. 水力停留时间对活性污泥系统的硝化性能及其生物结构的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1862-1865.
Li H Y, Zhang Y, Gao F, *et al.* Effects of hydraulic retention time (HRT) on nitrification performance and microbial community

- of conventional activated sludge (CAS) [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(9): 1862-1865.
- [8] Nogueira R, Melo L F, Purkhold U, *et al.* Nitrifying and heterotrophic population dynamics in biofilm reactors: effects of hydraulic retention time and the presence of organic carbon[J]. *Water Research*, 2002, **36**(2): 469-481.
- [9] Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3506-3512.
- [10] Wu P, Ji X M, Song X K, *et al.* Nutrient removal performance and microbial community analysis of a combined ABR-MBR (CAMBR) process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **232**(9): 273-279.
- [11] 刘捷, 吴鹏, 沈耀良. CAB-MBR 复合反应器实现亚硝化-脱氮除磷的启动研究 [J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(8): 3247-3252.
- Liu J, Wu P, Shen Y L. Start-up of CAB-MBR nitrosation-nitrogen and phosphorus removal [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(8): 3247-3252.
- [12] 程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 等. 基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4282-4288.
- Cheng C Y, Zhao S H, Lü L, *et al.* Optimization of denitrifying phosphorus removal performance based on ABR-MBR combined process [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4282-4288.
- [13] American Public Health Association, AWWA (American Water Works Association), Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater (17th ed.) [M]. American Public Health Association, 1989.
- [14] 尹航, 何理, 卢健聪, 等. 水力停留时间对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 [J]. *化工学报*, 2014, **65**(6): 2294-2300.
- Yin H, He L, Lu J C, *et al.* Effect of hydraulic retention time on nitrogen and phosphorus removal by biofilm and granular coupling process [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(6): 2294-2300.
- [15] 杜接弟, 王毅力, 李炯, 等. HRT 对 ABR 处理低浓度废水的效果和颗粒污泥特征的影响 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2022-2029.
- Du J D, Wang Y L, Li J, *et al.* Impact of hydraulic retention time (HRT) in ABR on its operation performance and granular sludge characteristics when treating low-strength wastewater [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(7): 2022-2029.
- [16] 芦家娟, 王毅力, 赵洪涛, 等. ABR 反应器的启动及颗粒污泥特征的研究 [J]. *环境化学*, 2007, **26**(1): 10-16.
- Lu J J, Wang Y L, Zhao H T, *et al.* The start-up of anaerobic baffled reactor (ABR) and the characteristics of granular sludge [J]. *Environmental Chemistry*, 2007, **26**(1): 10-16.
- [17] 芦家娟, 王毅力, 侯立安, 等. ABR 成熟颗粒污泥的分形特征与尺度效应 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 118-123.
- Lu J J, Wang Y L, Hou L A, *et al.* Fractal characteristics and scale dependence of mature granular sludge in anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(4): 118-123.
- [18] 姜潇, 王毅力, 张桐, 等. 厌氧折流板反应器 (ABR) 中成熟颗粒污泥的分形分析 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(4): 647-658.
- Jiang X, Wang Y L, Zhang T, *et al.* Fractal analysis on mature granular sludge in an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(4): 647-658.
- [19] Castignetti D, Hollocher T C. Heterotrophic nitrification among denitrifiers [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1984, **47**(4): 620-623.
- [20] Robertson L A, Kuenen J G. Aerobic denitrification—old wine in new bottles? [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1984, **50**(5-6): 525-544.
- [21] 程继辉, 吴鹏, 程朝阳, 等. 基于优质碳源提供的 CAMBR 复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4539-4545.
- Cheng J H, Wu P, Cheng C Y, *et al.* Shortcut nitrosation-denitrifying phosphorus removal based on high-quality carbon source in combined process of CAMBR [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4539-4545.
- [22] Zhang H M, Wang X L, Xiao J N, *et al.* Enhanced biological nutrient removal using MUCT-MBR system [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(3): 1048-1054.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNBf-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)