

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化

吕亮^{1,2}, 赵诗惠^{1,2}, 韦佳敏^{1,2}, 张敏^{1,2}, 尤雯^{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 ABR-MBR 耦合工艺对 MBR 反应器中实现短程硝化的运行控制条件进行了研究, 并为后续研究系统的反硝化除磷性能打下基础。ABR-MBR 耦合工艺在不同条件下的运行研究结果表明, 在 ABR 反应器的水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 6 h, 污泥回流比 100%, 硝化液回流比 300%, 温度 $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 通过控制好氧区溶解氧浓度 (DO 从 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为 $0.3 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 以及改变 MBR 反应器有效容积以控制其 HRT, 最终在 MBR 反应器 HRT 从 3 h 逐步延长至 5 h 时短程硝化遭到破坏, 亚硝酸盐积累率 (nitrite accumulation rate, NAR) 从 60% 急剧下降至 15%。短程硝化影响因素的分析表明: pH 值、游离氨 (free ammonia, FA) 和游离亚硝酸 (free nitrous acid, FNA) 对本试验实现短程硝化无显著影响, 维持低 DO 浓度 ($0.3 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 并逐步缩短 HRT 是本试验实现短程硝化的关键控制因素, 温度和污泥停留时间 (sludge retention time, SRT) 可作为辅助因素与之共同调控。短程硝化期间, 系统获得了高效且稳定的 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果, 平均出水浓度分别低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率均在 90% 以上, TN 平均去除率高达 72%。

关键词: ABR-MBR 耦合工艺; 短程硝化; 水力停留时间; 硝化液回流; 亚硝酸盐积累率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5154-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201706153

Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater

LÜ Liang^{1,2}, ZHAO Shi-hui^{1,2}, WEI Jia-min^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, YOU Wen^{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 operational control conditions for realizing shortcut nitrification in the membrane bioreactor (MBR) process was investigated in a lab-scale anaerobic baffled reactor (ABR)-MBR combined system, which laid the foundation for further research on the performance of denitrification phosphorus removal in the system. The experimental results under different conditions showed that shortcut nitrification in the MBR was achieved by controlling the dissolved oxygen (DO) concentration to low levels ($0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.3 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and changing the effective volume of the MBR to control hydraulic retention time (HRT), with the HRT in the ABR equal to 6 h, sludge reflux ratio of 100%, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ reflux ratio of 300%, and temperature of $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Finally, the shortcut nitrification deteriorated as the HRT in the MBR increased from 3 h to 5 h, with nitrite accumulation rate dramatically dropping from 60% to 15%. The analysis of the influencing factors of shortcut nitrification showed that maintaining low DO concentration ($0.3 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and gradually shortening HRT were the key factors. The pH, free ammonia (FA), free nitrous acid (FNA), temperature, and sludge retention time (SRT) had a slightly positive effect on shortcut nitrification. During the period of shortcut nitrification, a stable and high efficiency removal of COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were achieved, and the average concentration of the effluent of COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, whose removal rates were above 90%, were below $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, and the removal efficiency of total nitrogen (TN) reached 72%.

Key words: ABR-MBR combined process; shortcut nitrification; hydraulic retention time (HRT); $\text{NO}_x^- - \text{N}$ reflux; nitrite accumulation rate (NAR)

传统生物脱氮除磷工艺 (如 A^2/O) 存在氮和磷去除对碳源的竞争。生活污水的生物脱氮除磷常因碳源不足影响处理效果^[1]。自 Kuba 等^[2]观察到一类能够以 O_2 或者 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 作为电子受体吸磷的兼具反硝化和除磷作用的兼性厌氧菌, 以及 Satio 等^[3]报道 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 也可以作为电子受体进行吸磷反应, 并将此类微生物统称为反硝化除磷菌 (denitrifying

phosphorus removal bacteria, DPBs), 为这一问题的

收稿日期: 2017-06-15; 修订日期: 2017-06-30

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研究项目 (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

解决提供了有效途径. 与聚磷菌(PAOs)的不同之处在于, DPBs 可在缺氧环境下利用 $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ 而非 O_2 作为电子受体进行吸磷^[4, 5]. 因此, 可在碳源有限的条件下实现“一碳两用”之效^[6-8].

有研究表明, 厌氧折流板反应器(ABR)可与其它好氧反应器协同组合, 获得上述问题的解决^[9]. 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^[10], 产生 VFA 等优质碳源, 为除磷以及反硝化除磷提供优质碳源. 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^[11].

实现短程硝化(亚硝化)的主要控制因素有: HRT^[12]、DO 浓度^[13]、温度^[14]、SRT^[15]、pH 值^[16]、游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)^[17, 18]等. 本研究以生活污水为研究对象, 采用前期研究构建、旨在节能低碳消耗并取得满意效果^[19-21]的 ABR-MBR 协同组合工艺, 考察其实现短程硝化的调控措施, 以期为实现基于短程硝化的反硝化除磷提供优化运行条件.

1 材料与方法

1.1 试验装置

本研究采用的 ABR-MBR 一体化反应器工艺如图 1 所示. 其中, ABR 由 4 个隔室组成, 有效容积为 7.2 L; MBR 有效容积为 3.6 L. 运行过程中, 控制 ABR 第 1、2 隔室为厌氧, 第 3、4 隔室为缺氧, MBR 为好氧运行. 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 kPa, 则对膜组件进行化学清洗.

为实现短程反硝化除磷, 设置两个回流. 一是污泥回流 R_1 : 将 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; 二是硝化液回流 R_2 : 将 MBR 硝化液回流至 ABR 第 3 隔室, 使其处于缺氧环境而实现反硝化除磷. 采用蠕动泵控制进、出水和 R_1 、 R_2 , 并采用可编程逻辑控制器(PLC)控制水位的恒定并实现出水、冲洗等运行过程的自动控制.

1.2 试验用水和污泥

试验用水为生活污水与人工配水为 1:1 的低 C/N 模拟污水, 各项水质指标见表 1 所列. 采用葡萄糖、淀粉和蛋白胨及氯化铵、磷酸二氢钾适当补充、调节碳源和氮、磷. 试验用生活污水取自苏州市某高校生活污水, 接种污泥取自苏州某城市污水处理厂贮泥池及 A^2/O 好氧池, 后者属全程硝化污泥. 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
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^[22]分别测定 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. 数据分析中, 分别按式(1)和式(2)计算亚硝酸盐积累率(NAR)和 MBR 的实际水力停留时间(AHRT).

$$\text{NAR} = \frac{\rho(\text{NO}_2^- \text{-N})}{\rho(\text{NO}_2^- \text{-N}) + \rho(\text{NO}_3^- \text{-N})} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{AHRT}_\text{M} = \frac{1}{1 + R_2} \text{HRT}_\text{M} \quad (2)$$

式中, $\rho(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 为 MBR 反应器出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); AHRT_M 为 MBR 的实际水力停留时间(h); HRT_M 为 MBR 的名义水力停留时间(h).

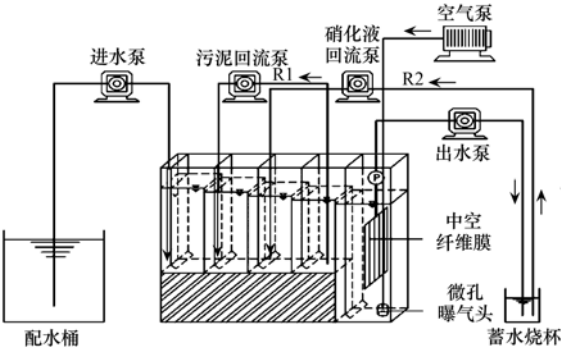


图 1 ABR-MBR 工艺试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the ABR-MBR setup

表 2 检测项目分析方法

Table 2 Test items and analytical methods for water quality	
检测项目	分析方法
COD	快速消解法
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂光度法
NO ₂ ⁻ -N	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法
NO ₃ ⁻ -N	紫外分光光度法
PO ₄ ³⁻ -P	钼锑抗分光光度法
MLSS	重量法
SV%	30 min 沉降法
pH	便携式 pH 计
DO	便携式 DO 测定仪
温度	温度计

1.4 试验过程

本研究运行分为 5 个阶段 (I ~ V), 各个阶段的运行参数如表 3 所列. 每个运行工况均在系统稳定运行后进行取样分析. 试验过程中, 以水浴加热控制温度. 冬季反应器内水温维持在 25℃ ± 2℃, 夏季则维持在 30℃ ± 2℃. MBR 采用低氧曝气方式运行, 其 DO 浓度为 0.3 ~ 1.0 mg·L⁻¹.

表 3 试验过程及参数和条件控制

Table 3 Experimental processes and parameter/condition control							
试验阶段	工况	HRT/h		回流比/%		温度/℃	DO/(mg·L ⁻¹)
		ABR	MBR	污泥 R ₁	硝化液 R ₂		
I	A (1 ~ 39 d)	12	6	0	0	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
	B (40 ~ 55 d)	12	6	100	100	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
II	C (56 ~ 77 d)	12	5	100	100	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
	D (78 ~ 104 d)	12	4	100	100	25 ± 2	0.5 ~ 1.0
III	E (105 ~ 117 d)	9	6	100	200	25 ± 2	0.3 ~ 0.7
	F (118 ~ 129 d)	9	5	100	200	25 ± 2	0.3 ~ 0.7
	G (130 ~ 141 d)	9	3	100	200	25 ± 2	0.3 ~ 0.7
IV	H (142 ~ 157 d)	6	3	100	300	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	I (158 ~ 171 d)	6	4	100	300	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	J (172 ~ 181 d)	6	5	100	300	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
V	K (182 ~ 191 d)	4	5	100	400	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	L (192 ~ 201 d)	4	4	100	400	30 ± 2	0.3 ~ 0.7
	M (201 ~ 211 d)	4	3	100	400	30 ± 2	0.3 ~ 0.7

2 结果与讨论

2.1 ABR-MBR 工艺短程硝化的实现

图 2 所示为 5 个阶段的试验期间 13 个工况下 MBR 出水 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和亚硝酸盐积累率

(NAR) 的变化情况. 图 3 所示为进出水氨氮浓度及氨氮去除率的变化.

运行的 1 ~ 39 d 为第 I 阶段. 此阶段为污泥适应期, 未进行污泥和硝化液的回流. 因研究中所接种的污泥为全程硝化污泥, 因而本身无 NO₂⁻-N 的积

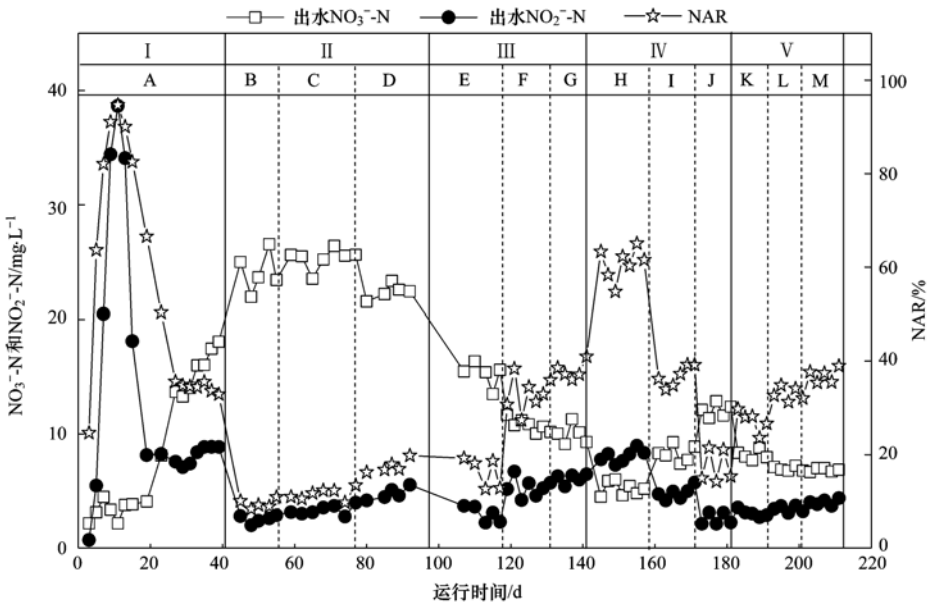


图 2 ABR-MBR 工艺中 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 浓度及 NAR 的变化

Fig. 2 Variations of NO₃⁻-N, NO₂⁻-N and NAR in the ABR-MBR process

累. 采取低 DO 运行, 利用低氧条件下 AOB 和 NOB 增值速率上的差异, 逐步实现 AOB 的富集. 由图 2 可见, 在运行的较短时间内出现了亚硝酸盐的积累, 其亚硝酸盐积累率(NAR)高于 90%. 其原因有 3 个: 一是较短的 HRT 有利于 AOB 将氨氮氧化过程控制在亚硝化阶段. 二是由图 3 可见, 进水氨氮平均浓度为 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高达 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 高的氨氮负荷利于 AOB 的增殖. 三是游离氨(FA)的增多有利于亚硝酸盐的积累. 试验阶段 I 初期氨氮去除率较低, 导致 MBR 反应器中存在大量 FA.

第 II 阶段进行污泥回流和硝化液回流, 并控制 ABR 的 HRT 为 12h, 污泥回流比和硝化液回流比均为 100%, 其中通过调节 MBR 的 HRT 以实现短程硝化. 由图 2 可见, 在第 II 阶段初期, MBR 的 HRT 为 6h 时, MBR 出水 NO_2^- -N 浓度较第 I 阶段有所降低, 随着 MBR 的 HRT 继续缩短, MBR 出水 NO_2^- -N 浓度略有增加, 而出水 NO_3^- -N 浓度基本维持在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, NAR 平均仅有 12.7%. 由此可见, 由于第 I 阶段的适应期较长且系统 HRT 较长, 导致污泥的硝化性能良好, 本阶段属于稳定的全程硝化阶段.

第 III 阶段将 ABR 的 HRT 缩短至 9h, 硝化液回流比增大至 200%. 如图 2 所示, 随着 MBR 的 HRT 逐渐从 6h 缩短至 4h, MBR 出水 NO_2^- -N 浓度逐步上升, NAR 逐渐升高, 由第 II 阶段最低的 8% 提高至 40% 左右, 相较于第 II 阶段有显著的提高. 由此可见, 系统 HRT 的缩短以及由增大硝化液回流比引起的在 HRT_M 逐步缩短基础上 AHRT_M 更进一步的降低导致了 NAR 逐渐升高, 本阶段为亚硝酸盐积累率上升期.

第 IV 阶段将 ABR 的 HRT 缩短至 6 h, 硝化液回流比增大至 300%, 本阶段将 HRT_M 从第 III 阶段末期的 3 h 逐步延长至 5 h. 由图 2 可见, 在 $\text{HRT}_M = 3\text{h}$ 工况下实现了短程硝化, 并稳定维持至下一工况, 时间长达 15 d, NAR 平均为 61%, 最高达到 65%, 而随着 HRT_M 的增大, 短程硝化被破坏, NAR 呈下降趋势. 由此可见, 低 HRT 对短程硝化的影响很大, 当 $R_2 = 300\%$, $\text{HRT}_M = 3 \text{ h}$ 时, AHRT_M 达到一个最优值, 使短程硝化得以实现并稳定维持.

第 V 阶段将 ABR 的 HRT 继续缩短至 4 h, 硝化液回流比增大至 400%, 由图 2 可见, 虽然系统的 HRT 和 AHRT_M 较第 IV 阶段更短, 且 NAR 也随着 HRT_M 的缩短而升高, 但仍然未获得理想的短程硝

化效果, MBR 出水 NO_2^- -N 浓度有所降低, 从而本阶段的 NAR 在整体上低于第 IV 阶段.

2.2 ABR-MBR 系统中亚硝酸盐积累的影响因素

Hellinga 等认为^[23], 实现与维持短程硝化的最佳温度是 $30 \sim 35^\circ\text{C}$, 此时 AOB 的生长速率高于 NOB. Balmelle 等认为^[24], AOB 最佳生长 pH 值约为 8.5. 本研究试验期间, MBR 中 pH 值平均为 8.27, 变化范围为 8.03 ~ 8.54, 在此范围内 AOB 与 NOB 活性相当, 故 pH 值不能作为实现短程硝化的主要影响因素. Anthonisen 等报道^[25], FA 对 AOB 和 NOB 抑制范围分别是 $10 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 本研究根据式(3)计算得出短程硝化期间 FA 浓度仅为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处于较低水平, 无法作为实现短程硝化的控制因素. Vadivelu 等发现^[26], 当 $\text{FNA} > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, AOB 受到抑制; 当 $\text{FNA} > 0.011 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NOB 受到抑制. 根据式(4)计算得出本研究短程硝化期间 FNA 平均值为 $0.00027 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对 AOB 和 NOB 均未起到抑制作用, 因此 FNA 亦不是本系统实现短程硝化的控制因素.

$$\text{FA} = \frac{[\text{NH}_4^+ - \text{N}] \times 10^{\text{pH}}}{\exp[6334/(273 + T)] + 10^{\text{pH}}} \quad (3)$$

$$\text{FNA} = \frac{47}{14} \times \frac{[\text{NO}_2^- - \text{N}]}{\exp[-2300/(273 + T)] \times 10^{\text{pH}}} \quad (4)$$

本研究中成功实现并维持短程硝化的原因有以下 4 点: ①低 DO. Guisasola 等报道^[27], AOB 和 NOB 的氧饱和常数分别为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.7 \sim 1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 另外有研究得出 AOB 和 NOB 的氧饱和常数分别为 $0.25 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.72 \sim 2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均证实 AOB 的氧饱和常数低于 NOB, 说明低 DO 浓度下 AOB 具有比 NOB 更强的竞争优势. 本试验全程维持 DO 浓度在较低水平, 导致 NOB 的活性长期受到抑制并通过排泥而被淘汰出系统, AOB 成为优势菌种. ②短 HRT_M . 有研究表明, 好氧 HRT 过长不利于短程硝化的实现并维持^[28, 29]. 延长好氧 HRT 意味着降低了氨氮负荷, 限制了 AOB 的增殖, 不利于促进系统对 NOB 的淘洗和 AOB 的富集. 本研究在既定 HRT 时逐步缩短 HRT_M , NAR 也逐渐升高并稳定维持. ③短 AHRT_M . 第 IV 阶段, $\text{HRT}_M = 3 \text{ h}$, $R_2 = 300\%$ 时, 成功实现了短程硝化, 这是因为随着硝化液回流比的增大, AHRT_M 进一步缩短, 将氨氮的氧化过程控制在亚硝化阶段, 加速了 NO_2^- -N 在好氧区和缺氧区

的交替,在 MBR 中生成的 NO_2^- -N立即随回流液进入到了缺氧区,以充当缺氧吸磷的电子受体而被去除.④合适的固体停留时间(SRT).Van 等^[15]认为 AOB 世代周期较 NOB 略短,温度在 14°C 以上时, AOB 和 NOB 的世代周期分别为 $8 \sim 36$ h 和 $12 \sim 59$ h.控制 SRT 介于 AOB 和 NOB 的泥龄之间便可一定程度实现 AOB 的积累,通过排泥将 NOB 逐渐淘洗掉,进一步提高 AOB 在硝化菌群中的比例^[12].本试验控制 SRT 为 $15 \sim 20$ d,与前述控制因素共同作用,最终实现短程硝化.

2.3 ABR-MBR 工艺对氮素的去除

图 3 所示为 ABR-MBR 工艺中氨氮去除情况.从中可见,试验第 I 阶段为污泥适应期,MBR 硝化性能不好, NH_4^+ -N 去除率不高.试验第 II 阶段好氧 MBR 的 DO 维持在 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统对 NH_4^+ -N 的去除率在 95% 以上(见图 4),但由于该阶段硝化液回流比为 100%,导致系统对 TN 去除率仅为 45.8%,出水 NO_3^- -N 浓度在 $24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

从图 3 中第 II 阶段的 B、C、D 工况可以看出,随着 HRT_M 的逐渐缩短, NH_4^+ -N 的去除率也随之下降,可见, HRT_M 的长短对 MBR 的硝化性能影响较大.如图 3 所示,在试验第 III 阶段,MBR 的 DO 维持在 $0.3 \sim 0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR 水力停留时间缩短至 9 h,回流比提高至 200%,系统 TN 去除率平均达到 65%,出水 NO_3^- -N 浓度在 $12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,随着 HRT_M 的缩短依旧与上一阶段一样出现 NH_4^+ -N 去除率下降的趋势,且由于 DO 浓度进一步降低的缘故下降幅度较上一阶段有所增大.试验第 IV 阶段,ABR 水力停留时间缩短至 6 h,回流比提高至 300%,系统 TN 去除率平均达到 72%,在此阶段的工况 H 下,MBR 实现了短程硝化,出水 NAR 达到 60% 以上,MBR 对 NH_4^+ -N 的去除率稳定在 97.8% (见图 3 和图 4).试验第 V 阶段,ABR 的 HRT 缩短至 4 h,回流比提高至 400%,TN 去除率可达 78%,且随着 HRT_M 的变化, NH_4^+ -N 去除率维持在 98% 左右.

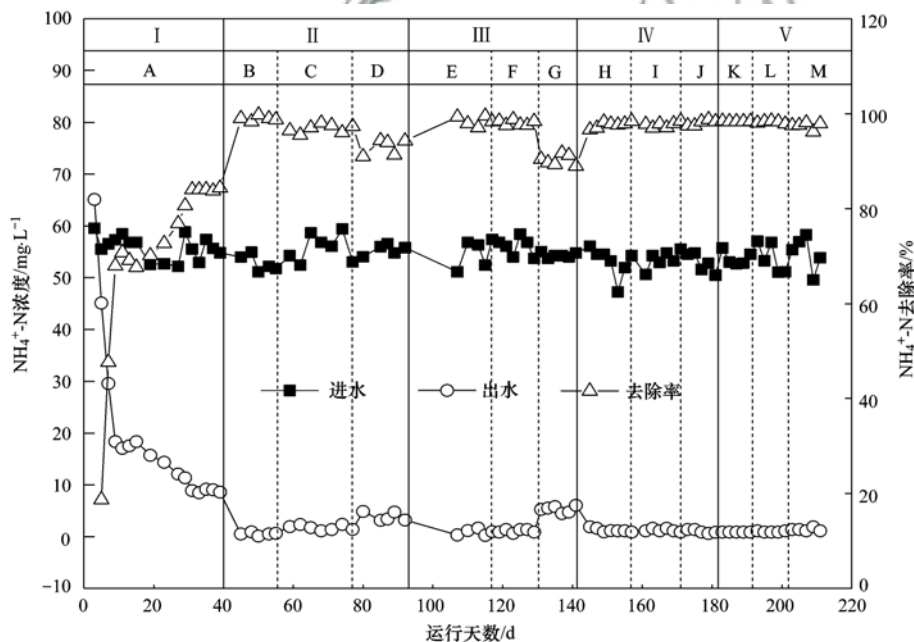


图 3 ABR-MBR 工艺中氨氮去除情况

Fig. 3 Removal of NH_4^+ -N in the ABR-MBR process

图 4 是系统在不同阶段下,稳定运行后具有代表性的各项水质指标的沿程变化情况.图 4(a)是试验第 II 阶段反应器各隔室氮素和 pH 值的变化规律.由图 4(b)可见,第 III 阶段缩短 ABR 水力停留时间和增大回流比后反硝化脱氮和除磷性能均有提升,相比于第 II 阶段,缺氧区的 pH 值上升幅度更大,第 2 隔室 pH 值下降幅度减小,降幅由第 II 阶段的 0.08 变为第 III 阶段的 0.04,但整体仍表现为

低于第 1 隔室的 pH 值.图 4(c)反映的是由于 ABR 的 HRT 缩短和回流比的增大,反硝化脱氮和除磷性能进一步提升,但反硝化脱氮作用强于释磷作用,导致整体表现为第 2 隔室 pH 值上升.图 4(d)为第 V 阶段时氮素和 pH 值的变化情况,总体趋势与上一阶段相同,第 2 隔室 pH 值上升幅度较第 IV 阶段更大,升幅由 0.08 提高至 0.12,由此可见,此阶段反硝化脱氮作用产生了较第 IV 阶段更多的碱

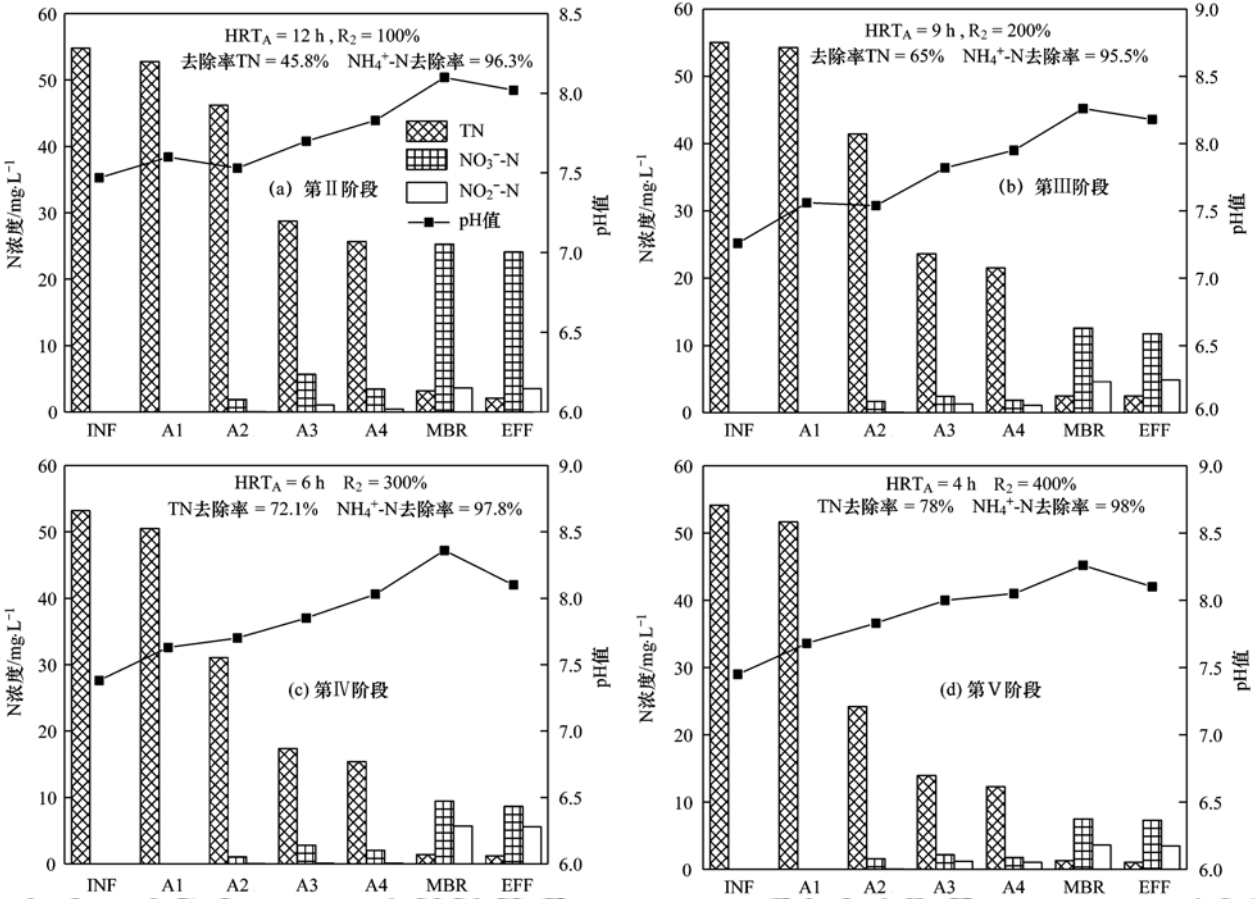


图4 ABR-MBR 工艺各阶段氮素和 pH 值变化

Fig. 4 Variation of nutrients and pH along the reactor in the ABR-MBR process during different stages

度,也说明了反硝化脱氮作用与释磷作用之间的差距更为明显.

2.4 ORP 各阶段各隔室的变化情况分析

不同阶段下,系统 ORP 各隔室变化情况见图 5. 4 个阶段 ORP 的变化规律相同. 由于首段厌氧

区 DO 浓度最低且无 NO_x^- -N,因此 ORP 也最低. 由于后续好氧区的硝化液回流,缺氧区存在少量的 DO 和 NO_x^- -N,其浓度介于厌氧区 and 好氧区之间,因此缺氧区 ORP 自然也介于两者之间. 好氧区由于曝气的作用 DO 浓度较高,且含有大量的 NO_x^- -N,因此 ORP 最高. 另外,从图 5 中也可以看出,随着硝化液回流比的逐渐增大,ABR 第 3、4 隔室的 ORP 也随之依次增大.

3 结论

(1)采用 ABR-MBR 耦合工艺处理实际生活污水,在 ABR 的 HRT 为 6 h,MBR 的 HRT 为 3 h,DO 浓度为 $0.3 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污泥回流比为 100%,硝化液回流比为 300%,温度为 $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的条件下,MBR 中成功实现了短程硝化,且平均亚硝酸盐积累率为 60%,最高达 65%.

(2)短程硝化期间,系统获得了高效且稳定的 COD 和 NH_4^+ -N 去除效果,平均出水浓度分别低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率均在 90% 以上,TN 平均去除率高达 72%.

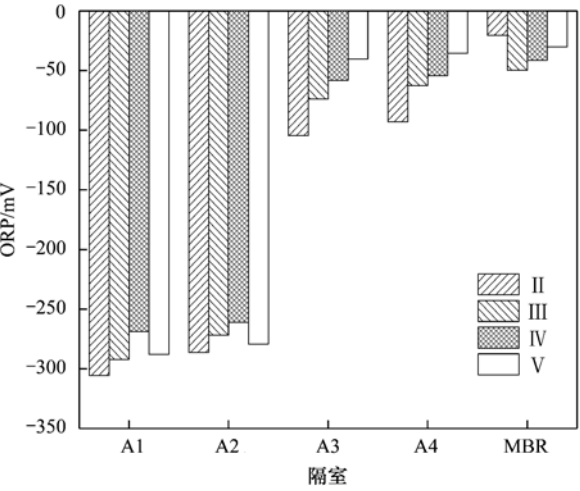


图5 不同阶段下各隔室 ORP 变化规律

Fig. 5 Variation of ORP along the reactor in the ABR-MBR process during different stages

(3)短程硝化影响因素的分析表明:pH 值、游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)对本试验实现短程硝化无显著影响,维持低 DO 浓度(0.3 ~ 0.7 mg·L⁻¹)并逐步缩短 HRT 是本试验实现短程硝化的关键控制因素,温度和污泥停留时间(SRT)可作辅助因素与之共同调控。

参考文献:

- [1] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A²/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system[J]. *Water Research*, 2002, **36** (8): 2109-2123.
- [2] 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.
- [3] Saito T, Brdjanovic D, Van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2004, **38**(17): 3760-3768.
- [4] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure[J]. *Water Research*, 2007, **41** (19): 4383-4396.
- [5] Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems[J]. *Water Research*, 2002, **36** (19): 4927-4937.
- [6] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system[J]. *Water Research*, 2001, **35** (16): 3968-3976.
- [7] Merzouki M, Bernet N, Delgenès J P, *et al.* Effect of prefermentation on denitrifying phosphorus removal in slaughterhouse wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(12): 1317-1322.
- [8] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **27**(3): 191-196.
- [9] 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.
- [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.
- [11] 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.
- [12] 曾薇, 李磊, 杨莹莹, 等. A²O 工艺处理生活污水短程硝化反硝化的研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(5): 625-632.
- Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Short-cut nitrification and denitrification in A²O process treating domestic wastewater[J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(5): 625-632.
- [13] 张小玲, 王志盈. 低溶解氧下 SBR 内短程硝化影响因素试验研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(1): 163-166.
- Zhang X L, Wang Z Y. Experimental study on influencing factors of short-cut nitrification at low DO concentration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34** (1): 163-166.
- [14] Blackburne R, Yuan Z, Keller J. Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor[J]. *Biodegradation*, 2008, **19**(2): 303-312.
- [15] Van Kempen R, Mulder J W, Uijterlinde C A, *et al.* Overview: full scale experience of the SHARON[®] process for treatment of rejection water of digested sludge dewatering[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(1): 145-152.
- [16] 孙洪伟, 王淑莹, 魏东洋, 等. pH 对高氨氮渗滤液短程生物脱氮反硝化过程动力学的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 742-748.
- Sun H W, Wang S Y, Wei D Y, *et al.* The effect of pH on the kinetics of denitrification in nitrogen removal via nitrite from landfill leachate with high ammonia concentration [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(4): 742-748.
- [17] Park S, Bae W. Modeling kinetics of ammonium oxidation and nitrite oxidation under simultaneous inhibition by free ammonia and free nitrous acid[J]. *Process Biochemistry*, 2009, **44**(6): 631-640.
- [18] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z. Free ammonia and free nitrous acid inhibition on the anabolic and catabolic processes of *Nitrosomonas* and *Nitrobacter* [J]. *Water Science and Technology*, 2007, **56**(7): 89-97.
- [19] Wu P, Ji X M, Song X K, *et al.* Nutrient removal from municipal wastewater and microbial community analysis of a combined ABR-MBR (CAMBR) process[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, **42**(6): 753-759.
- [20] 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 nitrification-nitrogen and phosphorus removal [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(8): 3247-3252.
- [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 nitrification-denitrification phosphorus removal based on high-quality carbon source in combined process of CAMBR [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4539-4545.
- [22] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (17th ed.) [M]. Washington, DC: American Public Health Association, 1989.
- [23] Hellings C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [24] Balmelle B, Nguyen K M, Capdeville B, *et al.* Study of factors controlling nitrite build-up in biological processes for water nitrification[J]. *Water Science and Technology*, 1992, **26** (5-6): 1017-1025.

- [25] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. Journal-Water Pollution Control Federation, 1976, **48**(5): 835-852.
- [26] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia and free nitrous acid concentration on the anabolic and catabolic processes of an enriched *Nitrosomonas* culture[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, **95**(5): 830-839.
- [27] Guisasola A, Jubany I, Baeza J A, *et al.* Respirometric estimation of the oxygen affinity constants for biological ammonium and nitrite oxidation [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2005, **80**(4): 388-396.
- [28] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. Water research, 2009, **43**(3): 563-572.
- [29] Zeng W, Li L, Yang Y, *et al.* Nitrification and denitrification of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A^2O) process at ambient temperatures [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(21): 8074-8082.

《环境科学》连续 5 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2016 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2016 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》再获“2016 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 5 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)