

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.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琄(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文桦, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行

印雯¹, 陈亚¹, 张钰¹, 徐乐中^{1,2,3*}, 吴鹏^{1,2,3}, 刘文如^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 采用改进型 ABR-MBR 反应器, 接种普通活性污泥, 以氨氮为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{C}/\text{N}=1$ 的人工配水为处理对象, 研究全程自养脱氮耦合反硝化除磷一体式工艺的启动及其脱氮除磷效能。控制反应器运行条件: 温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7.5 \pm 0.2$, 回流比由 50% 逐步提升至 200%。结果表明, ABR 厌氧阶段消耗 70% COD, 使得在低 DO、高氨氮下能够 21 d 内快速启动部分亚硝化; 随后以间歇曝气(曝停比: 2 h: 2 h, DO 为 $0.3 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的运行方式在 132 d 内成功启动耦合工艺内的 CANON 部分, 使得 ABR 缺氧段的电子受体中硝酸盐氮浓度稳步上升, 最终于 160 d 成功启动耦合工艺。稳定运行后, MBR 内 TN 去除负荷达到 $0.22 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 出水各项指标 COD、TN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率分别为 87.0%、90.4% 和 81.8%。批次试验估算 ABR 内以硝酸盐氮为电子受体的 PAOs 约占 PAOs 的 68%, 系统内已培育出相互适应协作的 DPAOs、AOB 和 AnAOB 菌种, 具有良好同步脱氮除磷效果。

关键词: 全程自养脱氮(CANON); 反硝化除磷; 耦合; 启动; 脱氮除磷

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5032-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904138

Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal

YIN Wen¹, CHEN Ya¹, ZHANG Yu¹, XU Le-zhong^{1,2,3*}, WU Peng^{1,2,3}, LIU Wen-ru^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National Regional Engineering Laboratory of Urban Domestic Wastewater Resources Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu High Education Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

Abstract: A process coupled completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) with denitrifying phosphorus removal in a modified anaerobic baffled reactor (ABR) coupled with a membrane bioreactor (MBR), inoculated with ordinary activated sludge, was proposed for treating artificial wastewater with ammonia $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $\text{COD}/\text{TN} = 1$. This experiment studied the start-up of the process and its nitrogen and phosphorus removal efficiency by controlling the recycle ratio and increasing it from 50% to 200% step by step, with a temperature of $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ and pH of 7.5 ± 0.2 . The results showed that the anaerobic part in the ABR consumed 70% COD, and resulted in a quick start-up of partial-nitrification at 21 d under low DO and high ammonia nitrogen. Then, by controlling the intermittent aeration (exposure stop ratio: 2 h: 2 h, DO 0.3-0.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the start-up of the CANON part in the coupling process was successfully achieved at 132 d, such that the concentration of nitrates in the electron acceptor of the ABR anoxic section increased steadily, and finally the coupling process started successfully at 160 d. With stable operation, the TN removal load in the MBR reached $0.22 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and the average removal efficiency of COD, TN, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was 87.0%, 90.4%, and 81.8%, respectively. The batch experiment estimated that the denitrifying phosphate accumulating organisms (DPAOs) using nitrates as electron acceptors in the ABR accounted for 68% of the phosphate accumulating organisms (PAOs). The DPAOs, ammonia-oxidizing bacteria (AOB), and anaerobic ammonium oxidizing bacteria (AnAOB) have been developed in the system and have good simultaneous nitrogen and phosphorus removal efficiency.

Key words: completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON); denitrifying phosphorus removal; coupling; start-up; nitrogen and phosphorus removal

全程自养脱氮(completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON)工艺因其具有污泥产量低^[1]、节省曝气^[2, 3]等优点, 广泛应用于高氨氮、低有机碳的废水处理^[4]。考虑到有机物对 CANON 的抑制作用^[5, 6], 目前 CANON 工艺在处理含有机物废水上存在着局限性, 同时 CANON 工艺出水中仍有 11% 的硝酸盐氮, 总氮去除率最高为 88%^[7], 需进一步提高出水水质。反硝化除磷(denitrifying phosphorus removal, DPR)工艺利用反硝化聚磷菌(DPAOs)^[8]在厌氧环境下将有机物转化成聚 β 羟

基丁酸(PHA)的同时充分释磷; 在缺氧环境中, 以硝酸盐氮或亚硝酸盐氮^[9]作为电子受体过量吸磷, 有研究表明电子受体无论是硝酸盐氮或亚硝酸盐氮, 最终磷的去除率都能达到 95%, 电子受体去除率接近 100%^[10, 11]。本研究考虑将 CANON 与 DPR

收稿日期: 2019-04-15; 修订日期: 2019-05-24

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); 江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修计划项目

作者简介: 印雯(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: yinwen94@yeah.net

* 通信作者, E-mail: kgre505@163.com

耦合,即以 CANON 出水的硝酸盐氮作为 DPR 的电子受体,利用 DPR 厌氧对有机物的去除作用打破 CANON 处理高有机碳废水的局限性,同时也解决其出水硝酸盐氮过量的问题,实现污水处理的同步脱氮除磷。

目前,乔森等^[12]通过接种成熟单级自养脱氮污泥与反硝化除磷污泥,在 35℃ 环境下历时 180 d 启动 DPAO-SNAP 耦合工艺。Zhao 等^[4]通过成熟污泥建立了一种将 SPNA 与改性 DPR 结合的新工艺,实现无需添加外源碳的氮磷深度去除。考虑到成熟 CANON 污泥不易获得,本研究以普通活性污泥为接种污泥,通过对菌种的驯化使其完成协同富集作用。

本研究采用 ABR-MBR 作为耦合工艺的运行装置。利用厌氧折流板反应器 (ABR) 的污泥产率低、容积负荷高^[13]、基质与污泥能充分接触混合^[14, 15]等优点,在不同的格室内提供严格的厌氧/缺氧环境,实现反硝化除磷。采用改进型的膜生物反应器 (MBR) 工艺实现 CANON,利用其生物截留作用^[16],防止厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 的流失。本试验进程中,通过回流泵将 MBR 内置沉淀区的出水回流至 ABR 的缺氧格室,以期在 DPR 提供电子受体的同时也实现了 CANON 工艺更高的出水水质。

1 材料与方法

1.1 试验装置

如图 1 所示,反应器采用有机玻璃复合材料。反应器高 25 cm,长 27 cm,宽 31.5 cm,ABR 和 MBR 有效体积分别为 6.4 L 和 6 L。试验采用蠕动泵连续进水,经 MBR 内部聚偏氟乙烯 (PVDF) 中空纤维微滤膜抽吸连续出水,膜孔径 0.1 μm,采用真空压力表反映膜污染情况并定期清理。为保证良好的推流式状态,ABR 第一格室内设置搅拌器,第三格室设置污泥回流 R1,MBR 内部设置沉淀区用于硝化液回流 R2。为防止光能自养微生物繁殖^[7],MBR 外部用黑色遮光布包裹,底部放置直径 12 cm 的曝气砂头。整个反应器放置在水浴缸内,温度控制在 (25 ± 1)℃。系统通过定期排放 ABR 缺氧末期泥水混合液,控制 SRT 为 25 d,将富含无机物和磷的污泥排出。

1.2 接种污泥及进水水质

ABR 和 MBR 格室污泥均取自苏州市某污水厂的普通活性污泥,MLSS 分别为 8.5 g·L⁻¹ 和 11.1 g·L⁻¹。试验初期对反硝化除磷污泥进行预培养,将 ABR 系统内的杂质、浮泥等排出。经过预培养的 ABR 系统内 DPAOs 得到初步富集,污泥的沉降性

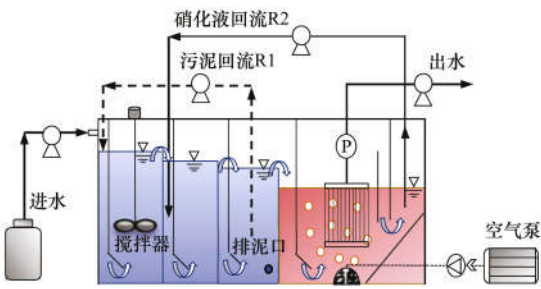


图 1 ABR-MBR 组合装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the ABR-MBR setup

能较好。试验采用人工配水,配水以 NH₄Cl、NaHCO₃ 为主要基质,并添加 KH₂PO₄、MgSO₄、CaCl₂ 及微量元素 I、II,具体进水水质指标见表 1。

表 1 进水水质

Table 1 Characteristics of the raw wastewater

分析指标	范围	均值
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	168.6 ~ 243.5	206.1
COD/mg·L ⁻¹	182.2 ~ 213.1	197.7
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	5.2 ~ 10.3	7.8
TN/mg·L ⁻¹	185.1 ~ 250.2	217.7

1.3 分析方法

启动过程中每隔 1 d 分别采集进出水以及各个格室的水样进行检测。NH₄⁺-N: 纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO₃⁻-N: 紫外分光光度法; COD: DRB 200 COD 消解仪-分光光度法; PO₄³⁻-P: 钼锑抗分光光度计; TN: 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; MLSS、MLVSS: 标准重量法; SVI: 30 min 沉降法; pH、DO: 便携式测定仪。

为方便数据分析,定义亚硝酸盐累积率 (NAR)、MBR 总氮去除负荷 (NRR_净) 如下:

$$\text{MAR} = \frac{c(\text{NO}_2^- - \text{N})}{c(\text{NO}_2^- - \text{N}) + c(\text{NO}_3^- - \text{N})} \times 100\%$$

式中, c(NO₂⁻-N) 和 c(NO₃⁻-N) 分别是 MBR 出水 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的质量浓度, mg·L⁻¹。

$$\text{NRR}_{\text{净}} = (\text{TN}_{\text{进}} - \text{TN}_{\text{出}}) \times \frac{Q}{V}$$

式中, NRR_净 为 MBR 格室内受 CANON 过程影响的总氮去除负荷, kg·(m³·d)⁻¹; TN_进 和 TN_出 分别为 MBR 反应器进水和出水的总氮浓度, mg·L⁻¹; Q 为进水流量, m³·d⁻¹; V 为 MBR 反应器有效容积, L。

1.4 批次试验

根据 Wachtmeister 等^[17]推荐的方法确定系统内聚磷菌组成。本研究取 1 000 mL 泥水混合液,用超纯水清洗 3 遍去除残留物质,置于磁力搅拌器

上,并投加 CH_3COONa 为碳源,使得初始 COD 为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进行 80 min 的厌氧搅拌,反应结束后,将混合液平均分成 3 份,一份好氧曝气($\text{DO}=2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),另外两份分别投加 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,运行 75 min,系统中 DPAOs 占 PAOs 比例的计算式如下.

$$K_{\text{ano1}} = \frac{P_{a_1,t_1} - P_{a_1,t_2}}{(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}}$$

$$K_{\text{ano2}} = \frac{P_{a_2,t_1} - P_{a_2,t_2}}{(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}}$$

$$K_{\text{aer}} = \frac{P_{o,t_1} - P_{o,t_2}}{(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}}$$

$$P_1 = \frac{K_{\text{ano1}}}{K_{\text{aer}}}$$

$$P_2 = \frac{K_{\text{ano2}}}{K_{\text{aer}}}$$

式中, K_{aer} 为好氧最大吸磷速率, K_{ano1} 和 K_{ano2} 分别为以 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为电子受体的缺氧最大吸磷速率(以 TP/MLSS 计), $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; P_{a_1,t_1} 、 P_{a_1,t_2} 、 P_{a_2,t_1} 、 P_{a_2,t_2} 、 P_{o,t_1} 和 P_{o,t_2} 分别为在 t_1 和 t_2 时间下,在 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为电子受体及好氧条件下 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; P_1 和 P_2 分别为亚硝酸型 DPAOs 和硝酸型 DPAOs 占 PAOs 的比例.

2 结果与讨论

2.1 CANON 的启动及稳定运行

2.1.1 AOB 的富集

本试验采用好氧/厌氧启动方式^[7],进水有机物(以 COD 计)浓度约为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水氨氮负荷为 $0.316 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.采用连续曝气的方式,DO 控制在 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.如图 2 所示,反应器运行到第 16 d 时, NAR 达到 64.2%,氨氮去除率达到 80.5%.到第 18 d,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度增至 $125.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降为 $36.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NAR 为 74.1%.连续运行 4 d 后, NAR 稳定在 75% 以上,表明反应器中亚硝化程度已基本满足 AnAOB 对于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的生长基质需求,认为反应器运行 21 d 成功实现了部分亚硝化.本试验主要通过控制低 DO 和高氨氮环境实现部分亚硝化的快速启动.一方面低 DO 条件下 AOB 对 DO 的竞争强于亚硝酸氧化菌(NO_B)^[18],有利于 AOB 的富集;另一方面高氨氮下游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)抑制 NO_B 的生长^[19],有利于 AOB 的稳定.在两者的共同作用下实现了部分亚硝化的快速启动.

2.1.2 MBR 全程自养脱氮的启动及 TN 去除特性

MBR 在第一阶段实现稳定的亚硝化后,通过

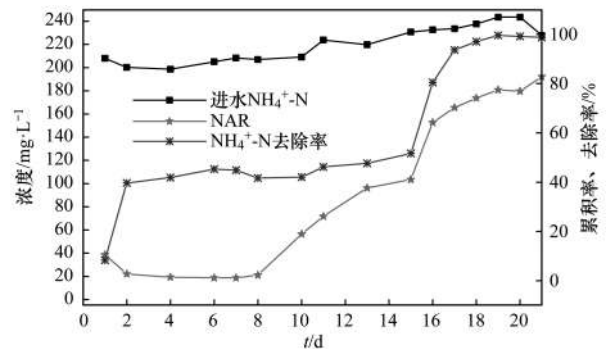


图 2 部分亚硝化启动过程中三氮及亚硝酸盐累积率变化情况

Fig. 2 Variations of tri-nitrogen concentration and NRR during partial-nitrification initiation

限氧和采用间歇曝气的调控方式进行第二阶段 AnAOB 的富集.控制 $\text{DO}:0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,曝停时间比: $2 \text{ h}:2 \text{ h}$ ^[20],使用液位控制仪设定 MBR 格室 HRT 为 6 h,反应器运行 137 d 后成功启动 CANON.如图 3 所示, AnAOB 整个富集过程分为 3 个阶段,冲击期(22~38 d)、适应期(39~70 d)和提高期(71~160 d).

在冲击期内(22~38 d),限氧的运行方式导致 CANON 出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度急剧下降,浓度从最高的 $126.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 骤降至 $60.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.反应器运行至第 35 d, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率下降至 15.3%,说明此阶段的限氧对亚硝化的稳定性造成了一定的冲击.值得注意的是,第 21 d 缺氧出水 COD 为 $110.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统 TN 去除率为 30.8%;运行至第 35 d 时,缺氧出水 COD 为 $82.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时系统 TN 去除率降低至 5.1%,说明随着缺氧段出水 COD 的减少, MBR 内的反硝化作用逐渐减弱,此阶段系统内总氮的去除主要是由于 ABR 缺氧段中 DPAOs 对回流液中电子受体的吸收.在适应期(39~70 d)内, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率趋于平缓, TN 去除率最高达到 11.6%, $\text{NRR}_{\text{净}}$ 为 $0.0116 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,表明此时已经出现 ANAMMOX 现象.在提高期(71~160 d)内, TN 去除率逐步升高,但是速度缓慢,推测是由于曝气量过低,导致 AOB 活性较低, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 生成量不能满足 AnAOB 的基质所需.提高曝气量至 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, MBR 内 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度提高至 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量逐步下降, TN 去除率显著提高,证明适当提高曝气能够增强 CANON 的活性,与李冬等^[21]的试验结果一致.反应器稳定运行至第 132 d 时, TN 去除率达到 57.5%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率达到 65.8%, $\text{NRR}_{\text{净}}$ 达到 $0.1055 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,连续运行 5 d 均大于 $0.10 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,并且 MBR 反应器内壁有较多红色污泥出现,推测此时已成功启动 CANON.

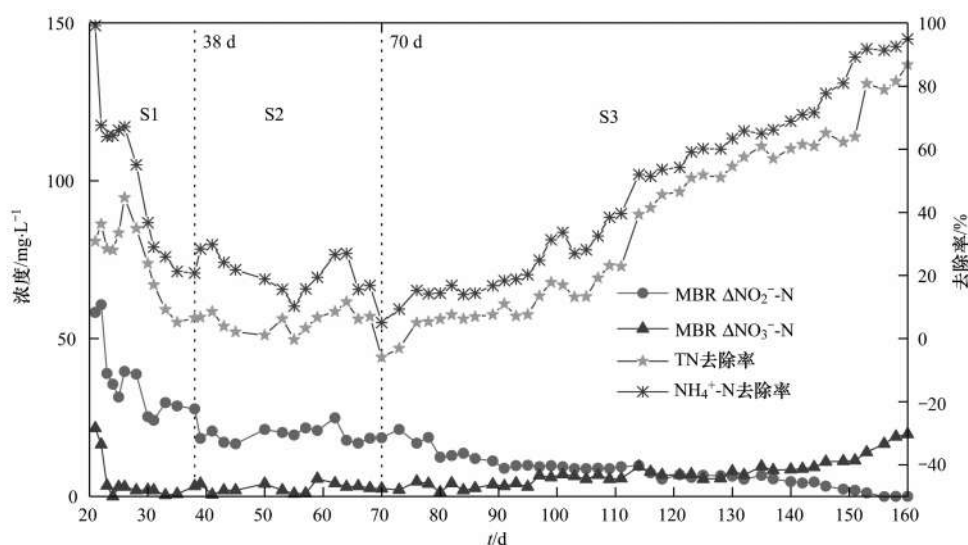


图3 MBR 格室进出水三氮浓度变化及系统内 TN 去除效能

Fig. 3 Variations of tri-nitrogen concentration in MBR and the TN removal efficiency in the system

Anthonisen 等认为^[22], NOB 对高 FA 有很强的敏感度. 而系统内平均 FA 为 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此条件下, NOB 生长速率远低于 AOB 和 AnAOB^[23], 可以认为几乎不存在 NOB. MBR 中 TN 的净损失量和 NO_3^- -N 的净生成量则全部是由 ANAMMOX 反应造成的^[24], 采用 $\Delta\text{TN}_{\text{净}}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N_净 来判断 CANON 的稳定性. 由反应式(1)可知理论值:

$$\Delta\text{TN}_{\text{净}}/\Delta\text{NO}_3^-$$

$$\text{NH}_4^+ + 0.85\text{O}_2 + 0.03\text{HCO}_3^- \longrightarrow 0.44\text{N}_2 + 0.11\text{NO}_3^- + 1.08\text{H}^+ + 1.44\text{H}_2\text{O} + 0.03\text{CH}_2\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.15} \quad (1)$$

如图 4 所示, $\Delta\text{TN}_{\text{净}}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N_净 比值在 7.8, 基本与理论值保持一致, 进一步说明试验已成功启动了 CANON, 且稳定性较好.

2.2 ABR 反硝化除磷的启动及稳定运行

ABR 段采用厌/缺氧的运行方式, 利用 MBR 中 CANON 的上清液作为反硝化除磷的电子受体实现

磷的去除. 由于启动阶段 MBR 格室内回流液水质的不同, 电子受体经历着由 NO_2^- -N/ NO_3^- -N 混合向 NO_3^- -N 的转变过程. 由此, 本试验中反硝化除磷主要经历两个阶段: 混合型 DPAOs 的富集和硝酸盐氮型 DPAOs 的驯化.

2.2.1 混合型 DPAOs 富集

第一阶段(第 32 ~ 102 d): 将 MBR 系统持续运行 31 d 后的上清液通过 R2 回流至 ABR 的第二格室, 此时 NO_2^- -N/ NO_3^- -N = $24.2/3.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于 MBR 格室内 AnAOB 倍增时间过长^[25], 出水中的 NO_2^- -N/ NO_3^- -N 浓度变化缓慢, 回流水质稳定, 有利于 DPAOs 的快速富集. 起初, 由于 DPAOs 不足, 利用电子受体进行除磷的能力较弱, 为避免缺氧末端剩余 NO_2^- -N/ NO_3^- -N 随着污泥回流 R1 进入厌氧区破坏厌氧状态, 促进反硝化菌滋长, 故将回流比设置为 50%. 根据对缺氧区剩余电子受

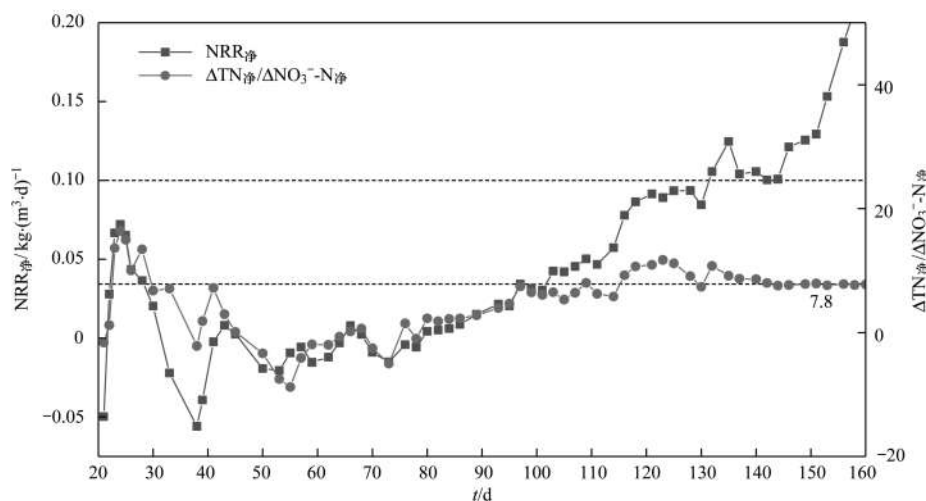


图4 MBR 格室内 TN 去除负荷及 CANON 稳定情况

Fig. 4 NRR and the stability of CANON in MBR

体浓度的测定, 及时调整回流比. 如图 5 所示, 运行至第 51 d, 缺氧段剩余 $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N} = 0.269/0.084 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明 DPAOs 已经能够将电子受体大量消耗, 此时释磷量为 $6.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸磷量为 $8.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总去除率为 21.5%. 第 52 ~ 70 d, 回流比提高至 100%, 缺氧区剩余电子受体消耗殆尽, 此时释磷量为 $9.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸磷量为 $9.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总去除率为 10.9%. 相比上一阶段, 总去除率有所下降, 分析原因是随着系统内 PAOs 活性的增强, 释磷量不断增加, 而电子受体

供应不足, 缺氧区重新回到厌氧状态, 出现二次释磷^[26]. 第 71 ~ 102 d, 回流比升高至 200%, 缺氧区剩余 $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N} = 0.318/1.215 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明系统内已经富集出混合型 DPAOs. 根据第 98 d 的代谢活性批次试验, 如图 6(a) 所示, $K_{\text{aer}} = 36.04 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, K_{ano1} 和 K_{ano2} 分别为 $21.52 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $11.51 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 计算可知系统内以亚硝酸盐氮与硝酸盐氮为电子受体进行缺氧吸磷的 PAOs 占 PAOs 的比例 P_1 和 P_2 分别约为 60% 和 32%.

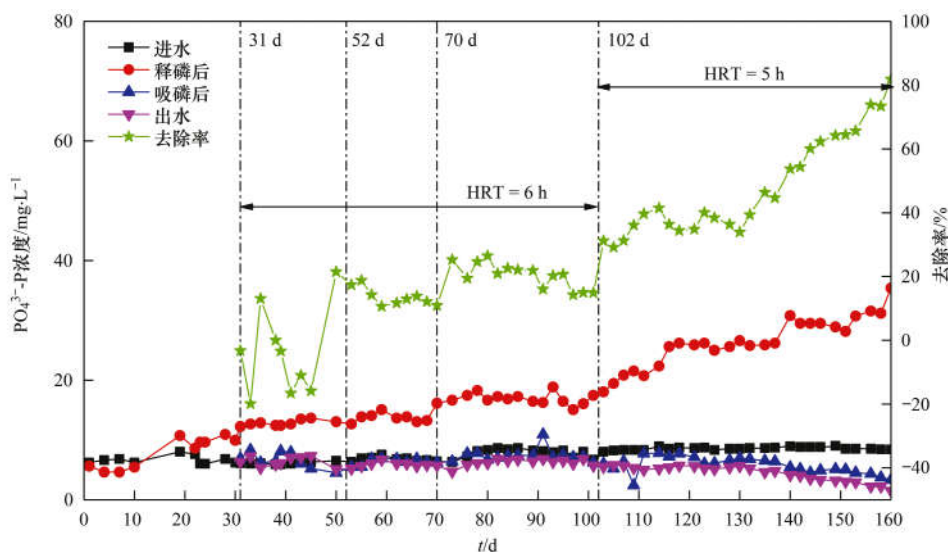


图 5 ABR 内 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 变化情况

Fig. 5 Variations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration in ABR

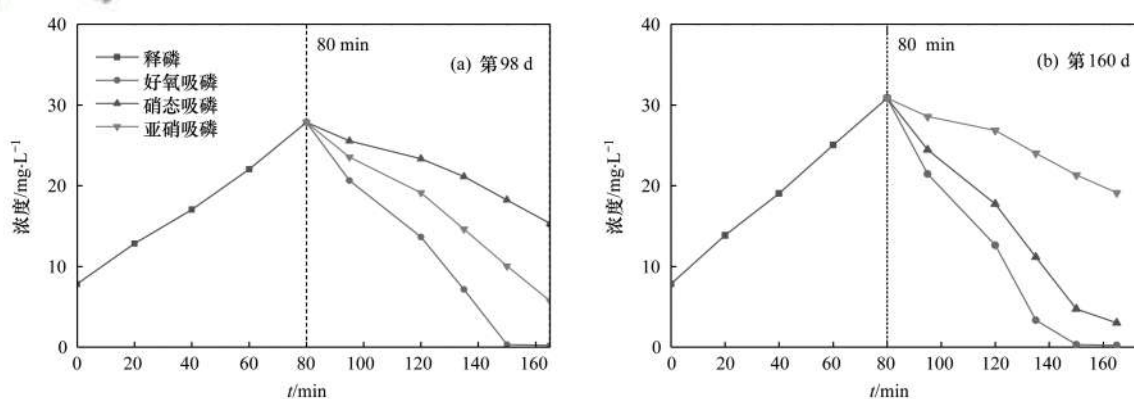


图 6 厌氧释磷与好氧/硝态/亚硝吸磷批次试验

Fig. 6 Phosphorus release and uptake under aerobic/nitrate/nitrite conditions

2.2.2 硝酸盐氮型 DPAOs 的富集

第二阶段(第 103 ~ 160 d): 运行至第 103 d, MBR 出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N} = 8.786/9.921 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着 AnAOB 的倍增, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 占据回流液主要成分. 此阶段, 通过逐步提高负荷以富集硝酸型 DPAOs 为优势菌. 回流比控制在 200%, HRT 缩短至 5 h, 进水流量的提高使得反应区内基质和污泥更充分接触. 稳定运行至第 160 d, 回流液中

$\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N} = 1.201/19.231 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 系统内剩余 $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N} = 0.143/0.112 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率接近 100%, 磷去除率为 81.8%, 推测系统内硝酸盐氮型 DPAOs 已成为优势菌种.

值得注意的是, 本试验过程中发现, ABR 的出水进入 MBR 后, 磷酸盐浓度有小幅下降. 推测是由于部分 DPAOs 随着进水进入 MBR, 且由于 MBR 中电子受体充足, 造成 MBR 有较好吸磷效果. 有

研究证明在 ANAMMOX 系统中, 较低浓度磷酸盐会通过微生物的生长繁殖得到分解利用, 且不会对 AnAOB 造成抑制^[27].

2.2.3 TP 和 COD 去除性能分析

系统内各格室 COD 去除效果如图 7 所示, 进水 COD 质量浓度范围 182.2 ~ 213.06 mg·L⁻¹, 出水稳定在 20 mg·L⁻¹ 以下, 整体去除率达到 87.0%. 其中, COD 在反硝化除磷段的厌氧区去除

率稳定保持在 70% 以上, 始终保证厌氧出水 COD 在 60 mg·L⁻¹ 以下, 避免了缺氧段在碳源与硝态氮同时存在条件下发生反硝化, 同时也为 MBR 较快实现 CANON 提供了条件. 试验证明, 少量 COD (<60 mg·L⁻¹) 的存在不会抑制 CANON, 反而会有促进作用, 这是由于 COD 刺激 MBR 内少量反硝化菌的生长, 从而利用反硝化作用生成的无机碳促进 ANAMMOX 过程, 这与李冬等^[28]的研究结果一致.

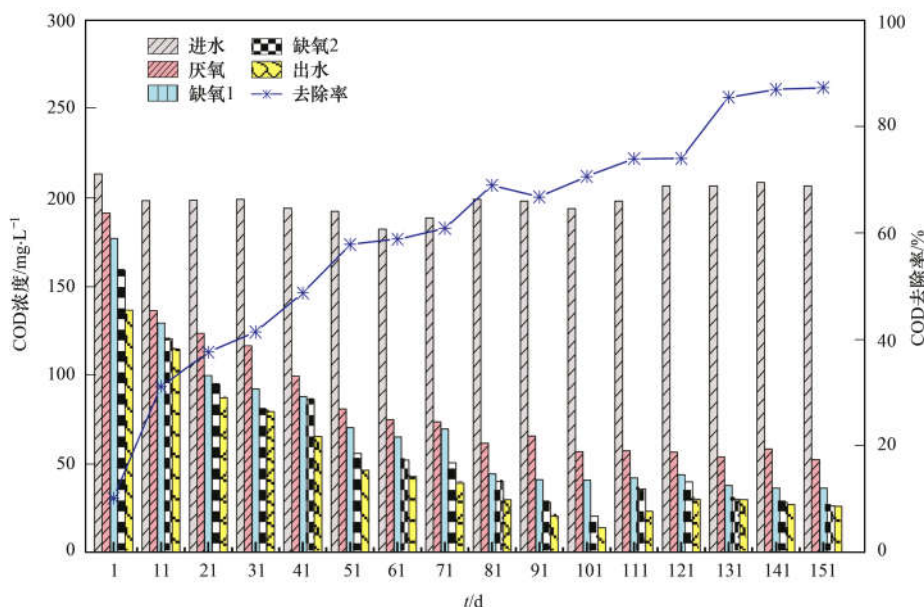


图 7 各格室 COD 去除情况

Fig. 7 COD removal in each compartment

图 6(b) 为第 160 d 代谢活性批次试验, 相比较第 98 d 的试验结果, $K_{\text{aer}} = 47.05 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 略有增长, 说明在 62 d 的驯化过程中, PAOs 活性得到进一步加强. 而缺氧段, 当 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 消耗殆尽时, TP 下降至 $3.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸磷量为 $27.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 试验结果得出, 每消耗单位 N 的聚磷量为 1.25 mg , 此结论与杨文婷等^[29]试验证明的每消耗 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 同时吸收 $1.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 接近. K_{ano1} 、 K_{ano2} 分别为 $11.51 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 与 $32.04 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 得出系统内约有 68% 与 25% 的 PAOs 能够分别以硝酸盐氮与亚硝酸盐氮为电子受体进行缺氧吸磷, 表明此阶段硝酸型 DPAOs 已经成为优势菌属.

3 结论

(1) 通过向改良型 ABR-MBR 内接种普通活性污泥, 在温度为 25°C , $\text{pH} = 7.5 \pm 0.2$ 下于 160 d 成功启动 CANON 耦合反硝化除磷工艺. 采用氨氮为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{C}/\text{N} = 1$ 的人工配水为处理对象, 稳定运行后, 出水各项指标 COD、TN 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率分别为 87.0%、90.4% 和 81.8%, 系统内已培育

出相互适应协作的 DPAOs、AOB 和 AnAOB 菌种, 具有较好的同步脱氮除磷效果.

(2) 将曝气提高至 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, MBR 内 TN 去除负荷达到 $0.22 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, $\Delta \text{TN}_{\text{净}} / \Delta \text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{净}}$ 稳定保持在 7.8, 与理论值相近, CANON 达到稳定运行. 第 160 d 批次试验得出, 约有 68% 的 PAOs 能够以硝酸盐氮为电子受体进行缺氧吸磷, 较第 98 d 比例有所提高.

(3) 随着回流比由 50% 逐步提高至 200%, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率逐渐升高. 当回流比 = 200% 时, 系统内硝酸盐氮去除率接近 100%, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率达 80% 以上.

参考文献:

- [1] Slikkers A O, Derwort N, Gomez J L C, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. Water Research, 2002, 36(10): 2475-2482.
- [2] 蔡庆, 张代钧, 丁佳佳. 全自养脱氮颗粒污泥的培养及脱氮性能的恢复与强化[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2805-2812.
- Cai Q, Zhang D J, Ding J J. The cultivation of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite granular sludge and the recovery and enhancement of nitrogen removal [J]. China Environmental Science, 2014, 34(11): 2805-2812.

- [3] Xiu Y, Yu G P, Liu Z H, *et al.* Start-up of the completely autotrophic nitrogen removal over nitrite process with a submerged aerated biological filter and the effect of inorganic carbon on nitrogen removal and microbial activity [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **254**: 347-352.
- [4] Zhao J, Wang X X, Li X Y, *et al.* Advanced nutrient removal from ammonia and domestic wastewaters by a novel process based on simultaneous partial nitrification-anammox and modified denitrifying phosphorus removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **354**: 589-598.
- [5] Zhang Y, Wang Y Y, Yan Y, *et al.* Characterization of CANON reactor performance and microbial community shifts with elevated COD/N ratios under a continuous aeration mode [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2018, **13**(1): 7.
- [6] Liu T, Li D, Zeng H P, *et al.* Biodiversity and quantification of functional bacteria in completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite (CANON) process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **118**: 399-406.
- [7] 李冬, 陈冠宇, 曾辉平, 等. 连续流全程自养脱氮工艺启动及脱氮性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, **49**(10): 182-188.
- Li D, Chen G Y, Zeng H P, *et al.* Start-up and denitrification performance analysis of CANON process in a continuous flow reactor [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, **49**(10): 182-188.
- [8] 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.
- [9] 王爱杰, 吴丽红, 任南琪, 等. 亚硝酸盐为电子受体反硝化除磷工艺的可行性[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(5): 515-518.
- Wang A J, Wu L H, Ren N Q, *et al.* Feasibility of denitrifying phosphorus removal technique using nitrite as electron acceptor [J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(5): 515-518.
- [10] 刘建广, 付昆明, 杨义飞, 等. 不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧吸磷的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1472-1476.
- Liu J G, Fu K M, Yang Y F, *et al.* Effect of electron acceptors on anoxic phosphorus uptake of DPB [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(7): 1472-1476.
- [11] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 碳源和硝态氮浓度对反硝化聚磷的影响及 ORP 的变化规律[J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 54-58.
- Wang Y Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of carbon source and nitrate concentration on denitrifying dephosphorus removal and variation of ORP [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(4): 54-58.
- [12] 乔森, 张美娇, 邵东海, 等. 新型单级自养脱氮与反硝化除磷耦合工艺[J]. 安全与环境学报, 2018, **18**(1): 257-263.
- Qiao S, Zhang M J, Shao D H, *et al.* Renovated coupling single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification process with phosphorus removal process [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(1): 257-263.
- [13] Fujihira T, Seo S, Yamaguchi T, *et al.* High-rate anaerobic treatment system for solid/lipid-rich wastewater using anaerobic baffled reactor with scum recovery [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **263**: 145-152.
- [14] 鲍林林, 陈婉秋. 基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2639-2645.
- Bao L L, Chen W Q. Nitrogen removal performance of novel HABR reactor over CANON process [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2639-2645.
- [15] Barber W P, Stuckey D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review [J]. *Water Research*, 1999, **33**(7): 1559-1578.
- [16] 闻刚, 徐乐中, 沈耀良, 等. 快速启动厌氧氨氧化工艺[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 1116-1121.
- Li G, Xu L Z, Shen Y L, *et al.* Quick start-up of anaerobic ammonium oxidation process [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1116-1121.
- [17] Wachtmeister A, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, **31**(3): 471-478.
- [18] 赵诗惠, 吕亮, 蒋志云, 等. ABR-MBR 组合工艺短程硝化过程的微生物种群 [J]. 中国环境科学, 2018, **38**(2): 566-573.
- Zhao S H, Lü L, Jiang Z Y, *et al.* Analysis of microbial population of shortcut nitrification in ABR-MBR process [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 566-573.
- [19] 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 等. 硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 [J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1697-1703.
- Sheng X L, Cui C C, Wang J D, *et al.* Pilot-scale experiment on enrichment of nitrifying activated sludge and its application in enhancing a wastewater biological treatment system against ammonia shocking loads [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1697-1703.
- [20] 韩懿, 张建兵, 黄巍, 等. 曝停比对低温单级自养脱氮系统效能影响研究 [J]. 中国给水排水, 2018, **34**(21): 70-73.
- Han Y, Zhang J B, Huang W, *et al.* Effect of aeration/idle time ratio on single-stage autotrophic nitrogen removal system at low temperature [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(21): 70-73.
- [21] 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.
- [22] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [23] 吴军, 张悦, 徐婷, 等. AOB 溶解氧亲和力低于 NOB 条件下序批反应器中 NOB 淘汰的实现机制 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(12): 3583-3590.
- Wu J, Zhang Y, Xu T, *et al.* Mechanisms of partial nitrification in sequencing batch reactor under the condition of AOB oxygen affinity lower than NOB [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3583-3590.
- [24] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响 [J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3507-3512.
- Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Performance stability of canon reactor and temperature impact [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3507-3512.
- [25] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [26] 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 等. ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 [J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 808-815.

- Wei J M, Jiang Z Y, Cheng C, *et al.* Start-up and stable operation of ABR-MBR denitrifying phosphorus removal process [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 808-815.
- [27] 张锦耀. 磷酸盐对高基质 CANON 与 UASB-ANAMMOX 工艺的脱氮特性影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- Zhang J Y. Effect of phosphate on the nitrogen removal characteristics of CANON and UASB-ANAMMOX process in high substrate [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [28] 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 等. 有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- Li D, Wang Y J, Lü Y F, *et al.* Effect of organic carbon source on start-up and operation of the CANON granular sludge process [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- [29] 杨文婷, 沈耀良. SBR 中反硝化聚磷菌的培养驯化研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(8): 6-8, 12.
- Yang W T, Shen Y L. Enrichment and cultivation of denitrifying phosphorus removing bacteria in sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(8): 6-8, 12.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社, 年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位, 年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位, 出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjxx@rcees.ac.cn;网址: www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)