

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解性黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤钾空间分布及农作物钾富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

基于 SBR-ABR 实现 PN-SAD 耦合工艺的运行与优化调控

陈重军^{1,2,3,4}, 张敏¹, 姜滢¹, 郭萌蕾¹, 谢嘉玮¹, 谢军祥¹, 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; 4. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 采用序批式活性污泥反应器-厌氧折流板反应器(SBR-ABR)组合工艺, 构建“部分亚硝化-厌氧氨氧化反硝化”(PN-SAD)反应链实现深度脱氮除碳。设定3种不同的运行工况, 工况Ⅰ将SBR出水(NO_2^- -N/ NH_4^+ -N为1~1.32)直接接入单隔室ABR厌氧氨氧化系统, 发现虽然实现了厌氧氨氧化反应的稳定运行, 但联合工艺总氮(TN)去除率低于80%, 出水TN约20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。为在ABR内增加反硝化功能, 向ABR反应器第三隔室添加反硝化污泥, 于工况Ⅱ将SBR出水接入, 发现耦合反应对TN去除率仍偏低, 若实现深度脱氮需在厌氧氨氧化后段补充碳源。故在工况Ⅲ调控SBR出水(NO_2^- -N/ NH_4^+ -N=5)与部分原水混合(NO_2^- -N/ NH_4^+ -N=1.4; C/N=2.5), 接入单隔室ABR厌氧氨氧化反硝化系统, 不仅实现了厌氧氨氧化段基质的良好配比, 也为反硝化提供了良好的有机碳源, 整个工艺出水COD为50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, TN在6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, TN去除率达到95%。在SBR-ABR反应器内构建PN-SAD联合反应为废水深度脱氮除碳提供了理论基础。

关键词: 序批式活性污泥反应器-厌氧折流板反应器(SBR-ABR); 厌氧氨氧化; 反硝化; 贡献率; 脱氮除碳

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0330-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907009

Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR

CHEN Chong-jun^{1,2,3,4}, ZHANG Min¹, JIANG Ying¹, GUO Meng-lei¹, XIE Jia-wei¹, XIE Jun-xiang¹, 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 Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China)

Abstract: This study uses three different operating phases for a sequencing batch reactor (SBR) combined with an anaerobic baffled reactor (ABR) to determine the effect of deep nitrogen and carbon removal by the “partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation combined denitrification” (termed PN-SAD) reaction. The effluent of the SBR (NO_2^- -N/ NH_4^+ -N ratio range of 1-1.32) was accessed directly to the single compartment ABR anammox system in phase I. The results showed that although the anammox reaction was stable, the combined process total nitrogen (TN) removal efficiency was < 80%, and the TN concentration of effluent was ~ 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. In order to increase the denitrification function in the ABR, denitrifying sludge was added to the third compartment of the ABR in phase II. We found that the TN removal efficiency of the coupling reaction was still low. An organic carbon source should be supplied in the latter stage of anammox if deep nitrogen removal is required. Therefore, in phase III, the effluent of the SBR (NO_2^- -N/ NH_4^+ -N ratio of ~5) was mixed with the partial raw water (mixed water NO_2^- -N/ NH_4^+ -N ratio of ~1.4; C/N ratio of 2.5). The mixed water was connected to the single compartment of the ABR. The PN-SAD system not only achieved a good matrix ratio at the anammox stage, but also provided a good carbon source for denitrification. The chemical oxygen demand (COD) concentration of the effluent in the whole process was 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the TN concentration of the effluent was < 6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the TN removal efficiency was 95%. We conclude that the stable operation of the combined PN-SAD reaction provides the basis for deep nitrogen and carbon removal using the combined SBR-ABR process.

Key words: SBR-ABR; anaerobic ammonium oxidation; denitrification; contribution efficiency; nitrogen and carbon removal

现阶段, 厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)具有脱氮效率高、能耗低、无需有机碳源等特点而备受关注^[1,2], 它的实现分为两种形式, 一种为单级反应, 以全程自养脱氮工艺(CANON)为代表^[3]; 另一种为两级反应, 以短程硝化-厌氧氨氧化联合工艺(SHARON-ANAMMOX)为代表^[4,5], 其中两级反应具有控制便捷、运行稳定

等特点。在两级式的工艺中, ANAMMOX 反应器多

收稿日期: 2019-07-01; 修订日期: 2019-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508366); 江苏水处理技术与材料协同创新中心预研项目(XTCXSZ2019-3); 江苏省环境科学与工程重点实验室开放基金项目(Zd1804); 江苏省厌氧生物技术重点实验室开放基金项目(KFLAB201701)

作者简介: 陈重军(1984~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为废水生物处理技术与机制, E-mail: chongjunchen@163.com

采用连续流^[6],前置的部分亚硝化反应器常采用能够快速启动、稳定控制的 SBR 反应器实现^[7, 8]. 近年来,有研究表明 ANAMMOX 可与反硝化在同一反应器内实现耦合^[9-12],解决了 TN 去除不完全及同步脱碳弱的难题,但对于利用部分亚硝化-厌氧氨氧化反硝化(PN-SAD)组合工艺实现废水的深度脱氮除碳的研究还较少. 因此,将两种不同类型的反应器组合并实现高效深度脱氮除碳对厌氧氨氧化工艺的推广应用具有重要意义.

为了考察在同一反应体系中,厌氧氨氧化菌(anaerobic ammonia oxidation bacteria, AAOB)和反硝化菌共同和分离生长环境下的协同作用,采用 ABR 反应器进行试验. ABR 反应器一般分为不同隔室,各隔室间存在显著差异的生物相,且生物富集和截留能力强,运行效果稳定^[13, 14],可为 AAOB 的生长提供良好的生存环境,并保持较高的活性^[15, 16]. 本研究采用 ABR 反应器构建 SAD 系统,在探明最

佳深度脱氮除碳的运行模式下,基于 SBR-ABR,确定间歇流与连续流相联合的控制策略,以期联合工艺的实际运行和调控提供借鉴和参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置

如图 1 所示,试验采用 SBR-ABR 两级反应器,反应器由有机玻璃制成. ABR 分为 3 个隔室,第一隔室用于 ANAMMOX 反应,第二隔室用于反硝化反应,第三隔室作为沉淀区,防止污泥的流失,降低出水 SS 浓度,总有效容积为 7.65 L,其中第一隔室的有效容积是第二隔室的 2 倍. ABR 反应器各隔室分升流区和降流区,隔间宽度比分别为 4:1,折流板导向 45°,并在各隔室连接部分设置筛网,以保持良好的微生物截留效应,采用精密蠕动泵从中间池连续进水. ABR 反应器整体采用塑料膜遮阳避光,且密封保证厌氧环境,在水浴锅中控制温度在 33℃ ± 2℃.

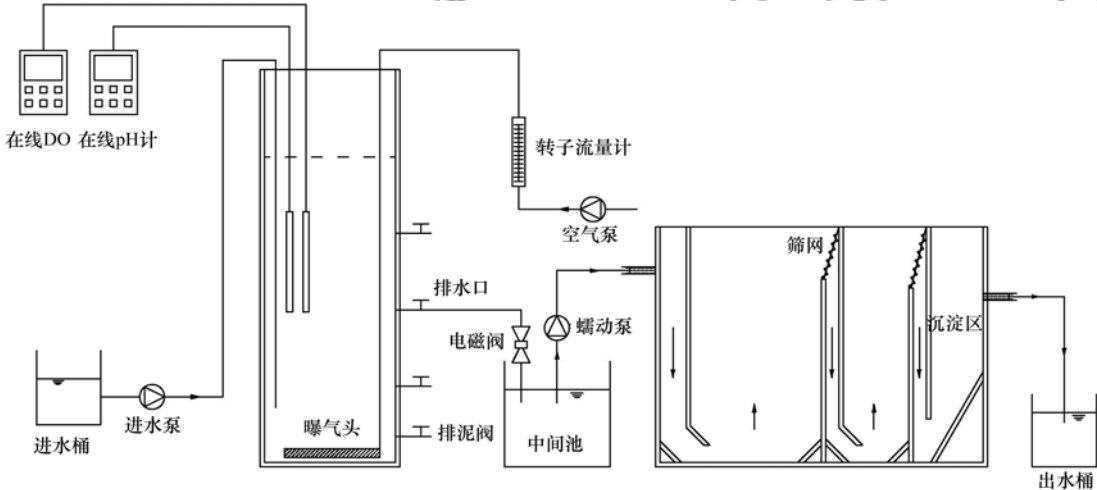


图 1 SBR-ABR 组合工艺示意
Fig. 1 Schematic of the SBR-ABR process

1.2 接种污泥及运行条件

为探索 ABR 脱氮除碳的最佳运行模式,将试验分为 3 个工况,各工况下 SBR 和 ABR 进水水质见表 1 和表 2. 工况 I, ABR 反应器仅在第一隔室接种长期储存且具有 ANAMMOX 功能的污泥,通过稳定运行恢复 AAOB 活性. 工况 II, 在 ABR 第二隔室接种某城市污水处理厂反硝化池内的反硝化污泥,观

察运行条件下系统脱氮除碳效能;工况 III, 将 ANAMMOX 污泥和反硝化污泥以 2:1 的比例混合至第一隔室,并通过调控中间池内 SBR 进出水配比改变 ABR 进水,确定最佳运行工况.

1.3 测试项目及方法

整个试验过程中每隔 2 ~ 3 d 采集 ABR 反应器各隔室水样,采样后立即测定,主要分析水样的 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 COD 等指标,测定方法采用文献[17]规定的标准方法.

1.4 厌氧氨氧化-反硝化反应脱氮除碳贡献率分析

在 SAD 碳氮脱除的过程中,主要存在以下反应,包括厌氧氨氧化脱氮反应[式(1)],以硝酸盐为基质的反硝化反应[式(2)],以亚硝酸盐为基质的反硝化反应[式(3)]以及以厌氧发酵、厌氧微生物生长等厌氧脱氮除碳过程^[18]. 因此,为分析 SAD 耦

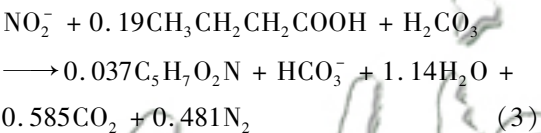
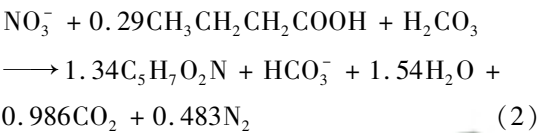
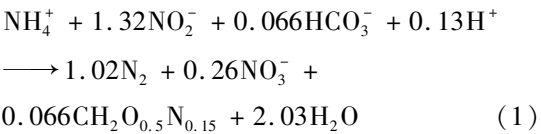
表 1 SBR 反应器进水水质

Table 1 Characteristics of the wastewater used in the SBR		
进水指标	浓度/mg·L ⁻¹	人工配药
pH	7.5 ~ 8.0	NaHCO ₃
NH ₄ ⁺ -N	250	NH ₄ Cl
NO ₂ ⁻ -N	0 ~ 0.3	—
NO ₃ ⁻ -N	0 ~ 2	—
COD	350 ~ 400	CH ₃ COONa
HCO ₃ ⁻ :NH ₄ ⁺ -N	2:1	NaHCO ₃

表 2 ABR 反应器运行工况
Table 2 Operating conditions of the ABR

工况	阶段	运行时间 /d	COD /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	基质比
I	厌氧氨氧化	1~30	50	56~70	41~53	1.32
II	厌氧氨氧化-反硝化(两级)	31~70	50	56~70	41~53	1.32
III	厌氧氨氧化-反硝化(单级)	71~100	100	50~70	35~50	1.4

合系统中的去除途径,以系统中厌氧氨氧化去除的 NO₂⁻-N 量,占整个系统中 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 去除总量的比值,作为厌氧氨氧化反应脱氮贡献率^[19]:



$$A = \frac{\text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{rem}}}{[(\text{NO}_2^--\text{N})_{\text{rem}} - \Delta(\text{NO}_3^--\text{N}) + 0.26(\text{NH}_4^+-\text{N})_{\text{rem}}]} \times 100\% \quad (4)$$

式中, (NH₄⁺-N)_{rem} 和 (NO₂⁻-N)_{rem} 分别为 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的去存量; ΔNO₃⁻-N 为 NO₃⁻-N 变化量。

2 结果与讨论

2.1 厌氧氨氧化启动和水质适应性分析

工况 I 期间,控制 SBR 出水 NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 为 1.1~1.32, HRT < 8 h, 利用中间池将 SBR 和 ABR 反应器连接,并设置 ABR 的 HRT 在 24 h, 保证反应器的连续进水。该阶段仅利用 ABR 的第一隔室,启

动 ANAMMOX 反应的同时,观察其对 SBR 出水的适应性。由图 2 可知,反应器运行的第 1~8 d, NH₄⁺-N 去除率仅为 15%~30%, NO₂⁻-N 去除率约 25%, 出水中 NO₃⁻-N 浓度变化不大,可知该阶段为 ANAMMOX 反应的适应期。运行至第 9 d 时,系统对 NH₄⁺-N 及 NO₂⁻-N 出现同步去除现象,去除率达 86% 和 75%, 出水 NO₃⁻-N 浓度增加,说明 ANAMMOX 反应启动成功。第 10 d 后,系统氮素去除率增加, NH₄⁺-N 及 NO₂⁻-N 的去除率增至 99% 和 95%, 平均 TN 去除率为 78%, 出水 NO₃⁻-N 浓度为 15~20 mg·L⁻¹, 其增加量是 NH₄⁺-N 的 0.17~0.25 倍, 刘晓萍等^[20]通过在 3 个反应器 R1、R2 和 R3 中接种不同硝化污泥和反硝化污泥,成功启动 ANAMMOX 反应器后稳定运行阶段的 ΔNH₄⁺:ΔNO₂⁻:ΔNO₃⁻ 分别为 1:1.30:0.23、1:1.35:0.10 和 1:1.23:0.18, 而公认的 ANAMMOX 反应中, ΔNH₄⁺:ΔNO₂⁻:ΔNO₃⁻ 为 1:1.32:0.26, 不同试验中接种物、试验方法、培养基质的不同,使与 ANAMMOX 反应共存的其他反应不同^[21], 是造成氮素增减量不同的主要原因。

如图 3 所示,工况 I 期间,进水 COD 为 50 mg·L⁻¹ 左右, C/N = 1, 经反应后出水 COD 浓度略有增加, COD 去除率为负值, 推测经部分亚硝化反应后检测到的出水 COD 增量为微生物代谢产生的难降解有机物(SMP), SMP 易在饥饿及内源代谢的条

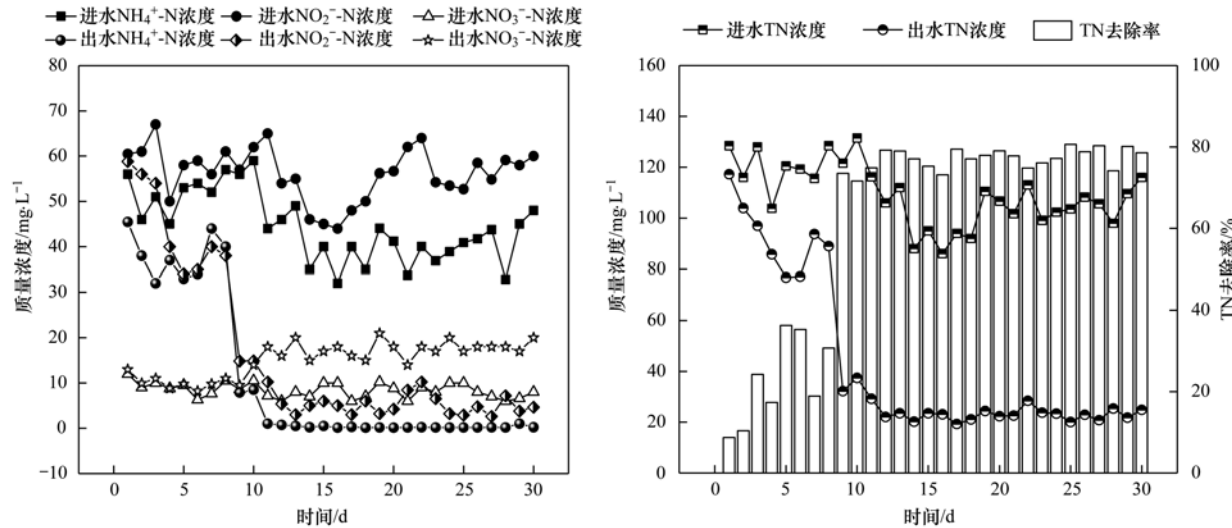


图 2 工况 I 期间进出水氮素变化情况
Fig. 2 Changes of nitrogen in influent and effluent during phase I

件下产生^[22], 而 TN 去除率持续保持在 80% 以下, 说明 SBR 出水中的有机物不足以作为培养反硝化的基质条件, 且易生物降解的有机碳源是发生反硝化的先决条件^[23], 故该工况下 SBR 出水基质不能为单隔室 ABR 厌氧氨氧化实现同时脱氮除碳提供条件。

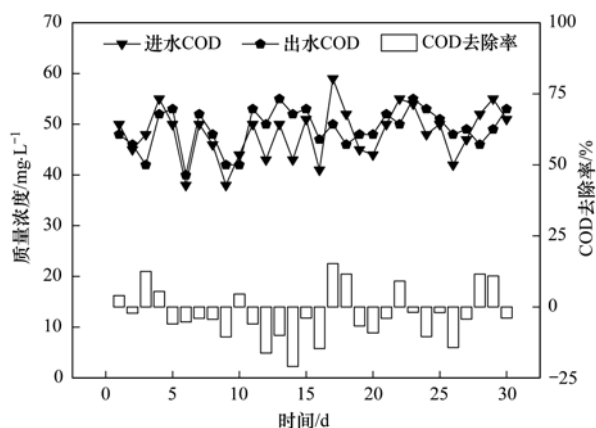


图3 工况 I 期间进出水 COD 变化情况

Fig. 3 Changes of organic matter in influent and effluent during phase I

2.2 双隔室厌氧氨氧化-反硝化

工况 II, 为了增加 ABR 的反硝化功能, 提高系统对 TN 的去除率, 在反应器的第二隔室接种反硝化污泥, 利用 ABR 的相分离在不同隔室内培养不同功能的微生物, 实现协同脱氮除碳。如图 4 和图 5 所

示, 反应器进水基质浓度不变, 增加反硝化隔室后的第 1~8 d, 出水 NO_3^- -N 浓度低于 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 70%~80%, 随后出水 NO_3^- -N 并未维持在低浓度, 而是恢复至 $15 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。根据式 (2) 和式 (3) 可知, 反硝化脱氮过程将消耗掉 2.86 倍 ΔNO_3^- -N 的 COD 和 1.71 倍 ΔNO_2^- -N 的 COD, 而本试验 ABR 内可微生物降解的有机物较少, 故反应初期, 反硝化效果良好是由于反硝化菌利用了自身细胞中的碳源进行脱氮, 而造成 NO_3^- -N 出现先降低后升高的现象。

反应的第 25 d, 人工投加一定量的乙酸钠至 ABR 第二隔室, 使第二隔室内的 COD 浓度为 $65 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为反硝化提供优质碳源。经过培养, 第 28 d 时出水 NO_3^- -N 浓度出现降低, 后稳定为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 出水 TN 浓度最终降至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, TN 去除率升至 88%, 第二隔室 COD 去除率约 40%, 实现了系统的脱氮除碳。杨敏等^[24] 在研究不同外加碳源下反硝化的技术经济性时得到乙醇、乙酸、乙酸钠这 3 种碳源单位 NO_3^- -N 去除量的投加成本分别为 15.08、15.20、28.98 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, 其中, 乙酸钠的投加成本最高, 进一步说明了尽管该工况在外加碳源条件下完成了碳氮的同步去除, 但在一定程度上碳源投加消耗了资源, 与节能降耗的理念不符。

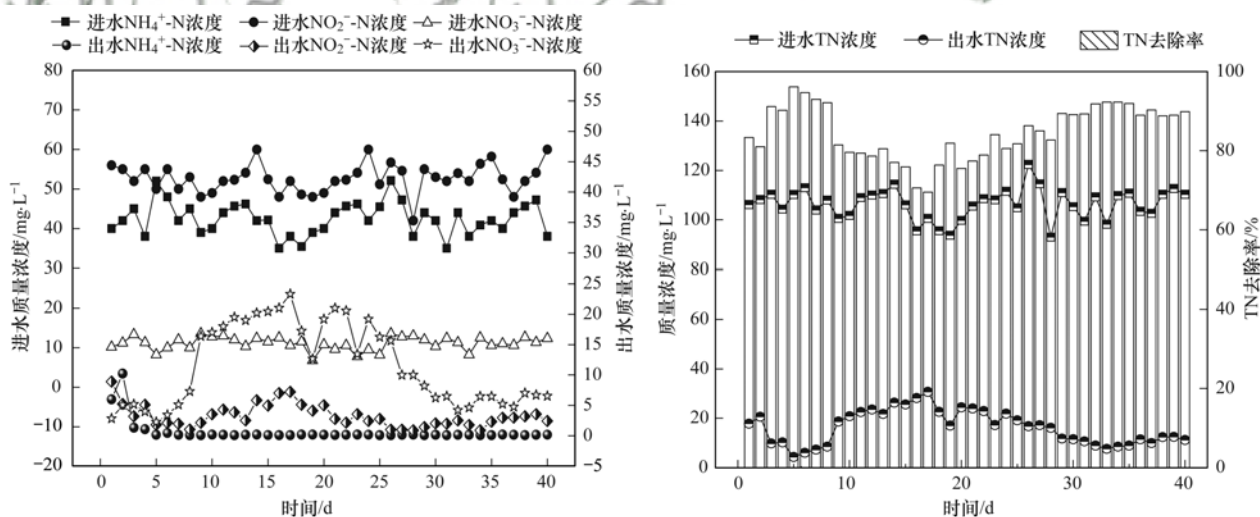


图4 工况 II 期间进出水氮素变化情况

Fig. 4 Changes of nitrogen in influent and effluent during phase II

2.3 单隔室厌氧氨氧化-反硝化

AAOB 与反硝化菌在适宜的 C/N 下可相互耦合, 两者相互作用, 共同促进, 达到同步脱氮除碳的过程, 而良好的进水基质比是 ABR 实现功能反应的必要前提, Chamchoi 等^[25] 的研究表明, 当 COD 浓度在 $100 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间 (C/N 为 0.9) 时, ANAMMOX 菌可以有效地与反硝化菌竞争, 表现为

高 TN 去除率和低 COD 去除率, 但 ANAMMOX 菌适合处理低碳氮比的废水; 黄孝肖等^[9] 综合各研究表明 ANAMMOX 与反硝化的耦合反应最适 C/N 为 0.5~1.0, 本研究在工况 III 期间控制 ABR 进水 C/N 在 2 左右的条件下进行培养。该工况具有两个关键调控: 一是调控 SBR 出水基质比, 二是调控 ABR 的超低排放。

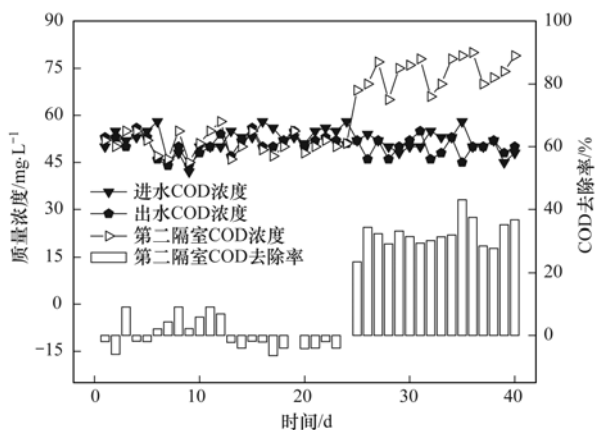


图5 ABR 工况 II 下进出水 COD 变化情况

Fig. 5 Changes of organic matter in influent and effluent during phase II

2.3.1 SBR 出水基质比的调控

本试验采用 SBR 进出水配比的方式为 ABR 提供适宜的进水,根据 SBR 进水属于低 C/N 的特点,通过张敏等^[8]的调控方法,在环境温度为 $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 下,将 pH 终值设为 7.86,稳定 MLSS 在 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可得到 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $10 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 $60 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N} = 5$), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $15 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的出水,然后将该出

水在中间池内与进水 ($\text{NH}_4^+ - \text{N} = 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{COD} = 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 以 8:1 的体积配比得到基质浓度: $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $32 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 $45 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $2 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD 为 $80 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N} = 1.4$ 、 $\text{C} / \text{N} = 2.5$) 的混合水。

2.3.2 部分亚硝化-厌氧氨氧化反硝化耦合阶段

图 6 和图 7 分别为 ABR 单隔室内运行同步厌氧氨氧化-反硝化反应 (SAD) 时进出水氮素和 COD 浓度与去除率的变化情况。从中可知,耦合启动期间 (前 3 d), COD 利用率仅 20%,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度略有增加, $\Delta \text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,是 $\Delta \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 0.17 倍,低于工况 I 下的增加量。另外,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 有剩余,浓度为 $5 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率保持在 99% 以上,说明反应系统内存在一部分的反硝化菌,在基质条件充足的情况下,开始参与反应。随着反应的运行,系统内的碳氮进一步得到降解,在第 5 d 之后,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN 浓度分别低至 0.5、3.0、3.5 和 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, TN 平均去除率为 95%,出水 COD 浓度为 $45 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 55%,且稳定出水 30 d 左右,实现了无外加能耗下的低碳氮排放。

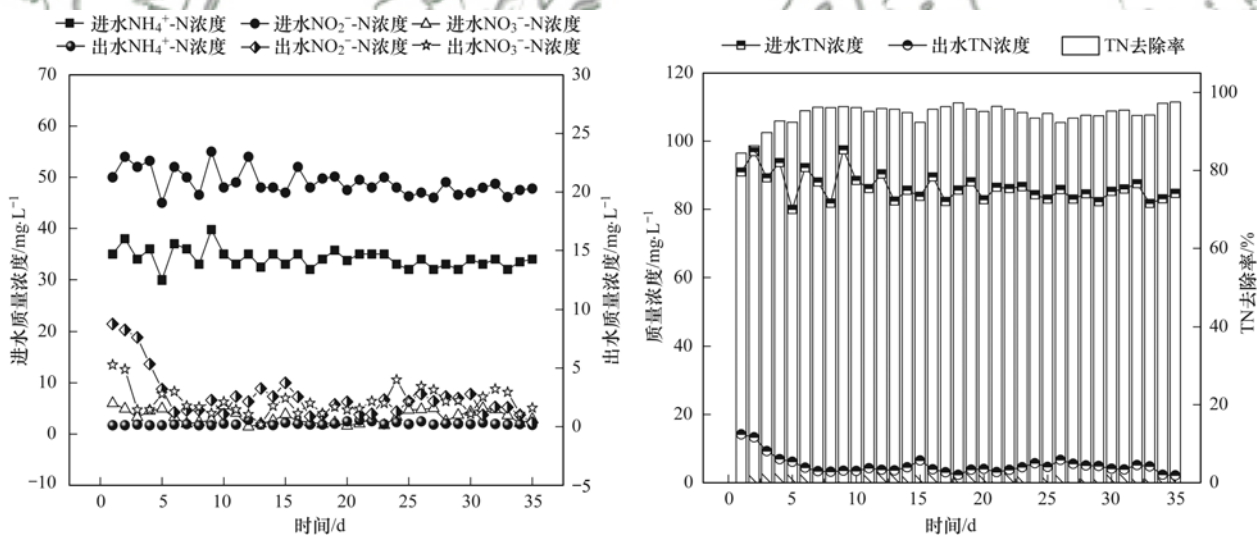


图6 工况 III 期间进出水氮素变化情况

Fig. 6 Changes of nitrogen in influent and effluent during phase III

为了进一步分析 ABR 单隔室内 ANAMMOX 与反硝化耦合反应对碳氮去除的贡献率,根据反应方程式 (1) ~ (3),所有的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 都由 ANAMMOX 反应过程去除,由式 (1) 可知,去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的同时需同步去除 1.32 倍的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。同时,余下的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 由亚硝酸型反硝化去除,由式 (3) 可知,需要同步消耗 $\Delta \text{NO}_2^- - \text{N}$ 的 1.71 倍 COD。而且,进水中带入的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与厌氧氨氧化反应生成的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 由硝酸型反硝化反应去除,由式 (2) 可知需要消耗掉 $\Delta \text{NO}_3^- - \text{N}$ 的

2.86 倍 COD。最后,剩余的 COD 由其他厌氧生物除碳途径去除。厌氧氨氧化和反硝化的贡献率可由式 (4) 得出。

由工况 I 和工况 II 中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除量及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的生成量可知,本研究中 ANAMMOX 反应的 $\Delta \text{NH}_4^+ : \Delta \text{NO}_2^- : \Delta \text{NO}_3^-$ 的平均值在 1:1.15:(0.21),利用该比值通过公式 (4) 可得到各去除途径占系统脱氮除碳的百分比,如图 8 所示。ANAMMOX 反应占 71.44%,亚硝酸型反硝化占

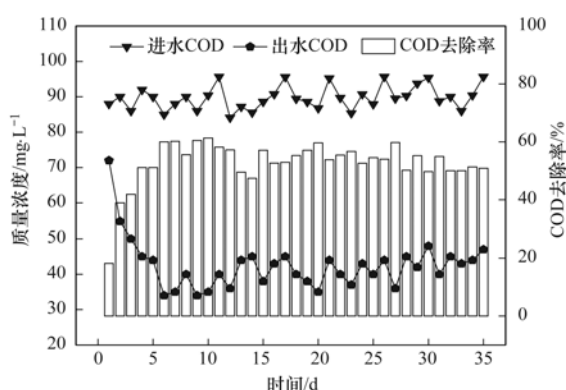


图7 工况Ⅲ期间进出水 COD 变化情况

Fig. 7 Changes of organic matter in influent and effluent during phase III

9.52%, 硝酸型反硝化占 13.72%, 而其他厌氧过程占 5.32%。

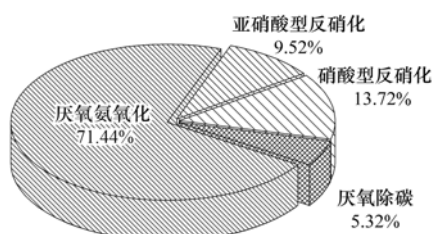


图8 最优工况下各脱氮除碳途径所占的百分比

Fig. 8 Percentage of each nitrogen removal pathway in a typical cycle

比较 3 个运行工况, 工况Ⅲ具有一定的优势:

①通过调控 SBR 进出水的配比, 可灵活改变 ABR 进水基质比 ($\text{COD}:\text{NO}_2^--\text{N}:\text{NH}_4^+-\text{N}$), 为实现亚硝化-厌氧氨氧化反硝化提供良好的前提条件; ②采用 SBR 进出水配比的方式可降低 ABR 进水 NO_3^--N 浓度; ③将 ANAMMOX 与反硝化在单隔室和双隔室内的耦合相比较, 单隔室耦合反应的调控具有一定简易性, 无需考虑外加碳源的类型和投加量等因素。

3 结论

(1) 利用 ABR 多隔室的构型, 分别在单隔室和双隔室内实现了 ANAMMOX 和反硝化同步脱氮除碳的耦合反应。

(2) 双隔室实现的 ANAMMOX-反硝化反应是通过投加乙酸钠作为外加碳源, 使出水 TN 和 COD 浓度达 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 但其对碳氮的去除效果受限于碳源的投加量, 经济性较差。而单隔室内实现的耦合反应是通过在中间池内将 SBR 进出水以 8:1 体积配比, 改变 ABR 进水基质比, 最终出水 TN 和 COD 浓度达到 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 且 ANAMMOX 对系统耦合脱氮的贡献率占 71.44%, 占主导地位。

(3) 单隔室下实现的耦合反应无需外加碳源,

可根据反应器的实际去除情况灵活调控 SBR 出水水质或 SBR 进出水在中间池内的配比, 达到最佳的出水水质, 具有较强的实际应用价值。

参考文献:

- [1] van der Star W R, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [2] 李海玲, 李冬, 张杰, 等. 调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 837-844.
- [3] Li H L, Li D, Zhang J, *et al.* Adjusting temperature and settling time to achieve ANAMMOX particles rapid start-up and stable operation [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 837-844.
- [4] 李冬, 赵世勋, 王俊安, 等. 污水处理厂 CANON 工艺启动策略[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4125-4131.
- [5] Li D, Zhao S X, Wang J A, *et al.* Startup strategies of CANON process in wastewater treatment plant [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4125-4131.
- [6] 任玉辉. 低基质亚硝化与厌氧氨氧化脱氮效能及微生物特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] Re Y H. Research on nitrogen removal performance and microbial characteristics of partial nitrification and ANAMMOX for low strength wastewater treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [8] Sri Shalini S, Joseph K. Start-up of the SHARON and ANAMMOX process in landfill bioreactors using aerobic and anaerobic ammonium oxidising biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **149**: 474-485.
- [9] 张敏, 姜滢, 汪瑶琪, 等. 基质浓度对 ABR 反应器 SAD 协同脱氮除碳效能影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3254-3261.
- [10] Zhang M, Jiang Y, Wang Y Q, *et al.* Effect of substrate concentration on SAD collaborative nitrogen and carbon removal efficiency in an ABR reactor [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3254-3261.
- [11] 张敏, 汪瑶琪, 姜滢, 等. 匹配厌氧氨氧化型亚硝化的调控过程研究进展[J]. *水处理技术*, 2018, **44**(5): 7-12.
- [12] Zhang M, Wang Y Q, Jiang Y, *et al.* Research progress of regulatory process of anammox adopting nitrosation [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, **44**(5): 7-12.
- [13] 张敏, 姜滢, 温婧玉, 等. 环境温度下 SBR 实现稳定部分亚硝化研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4509-4515.
- [14] Zhang M, Jiang Y, Wen J Y, *et al.* Achieving stable partial nitrification in SBR at ambient temperature [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4509-4515.
- [15] 黄孝肖, 陈重军, 张蕊, 等. 厌氧氨氧化与反硝化耦合反应研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(3): 849-856.
- [16] Huang X X, Chen C J, Zhang L, *et al.* Research progress in anammox-denitrification coupling process [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(3): 849-856.
- [17] Ni S Q, Ni J Y, Hu D L, *et al.* Effect of organic matter on the performance of granular anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **110**: 701-705.
- [18] 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 等. 有机碳源对厌氧氨氧化污泥颗粒化的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, **50**(9): 116-122.
- [19] Li D, Wang Y J, Lü Y F, *et al.* Effect of organic carbon source on granulation of anaerobic ammonia oxidation sludge [J].

- Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, **50**(9): 116-122.
- [12] Qin Y J, Cao Y, Ren J Y, *et al.* Effect of glucose on nitrogen removal and microbial community in anammox-denitrification system[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **244**: 33-39.
- [13] Jin R C, Yu J J, Ma C, *et al.* Performance and robustness of an ANAMMOX anaerobic baffled reactor subjected to transient shock loads[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 126-136.
- [14] 闰刚, 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.
Lü 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.
- [15] 李泽兵, 刘常敬, 赵白航, 等. 多基质时厌氧氨氧化菌、异养反硝化污泥活性及抑制特征[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 648-654.
Li Z B, Liu C J, Zhao B H, *et al.* Activity and inhibition characteristics of anammox and heterotrophic denitrifier bacteria in a multi-substrate system[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(4): 648-654.
- [16] 张海芹. ABR 反应器厌氧氨氧化启动及其脱氮效能的研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2015.
Zhang H Q. Study on Start-up and nitrogen removal efficiency of ANAMMOX in ABR[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(5): 1-4.
Zhou S Q. Stoichiometric analysis of combined reaction of anaerobic ammonia oxidation with denitrification[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, **34**(5): 1-4.
- [19] 于德爽, 魏思佳, 李津, 等. 温度对厌氧氨氧化与反硝化耦合脱氮除碳的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1384-1391.
- Yu D S, Wei S J, Li J, *et al.* Effect of temperature on simultaneous carbon and nitrogen removal by anaerobic ammonium oxidation and denitrification [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1384-1391.
- [20] 刘晓萍. 厌氧氨氧化菌的富集及其与反硝化菌协同脱氮研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
Liu X P. Enrichment of anaerobic ammonium oxidation bacteria and coupled with denitrification bacteria for nitrogen removal [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.
- [21] 黄曦, 张雁秋, 李开奎. 浅谈 ANAMMOX 反应的启动研究[J]. *污染防治技术*, 2010, **23**(1): 74-77.
Huang X, Zhang Y Q, Li K L, *et al.* Studies on the start-up of ANAMMOX[J]. *Pollution Control Technology*, 2010, **23**(1): 74-77.
- [22] 董春娟, 吕炳南. 污水生物处理中的溶解性微生物产物(SMP)[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(1): 22-25.
Dong C J, Lv B N. Soluble microbial product (SMP) in biological treatment of wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, **20**(1): 22-25.
- [23] 周丹丹, 马放, 董双石, 等. 溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(4): 25-28.
Zhou D D, Ma F, Dong S S, *et al.* Influences of DO and organic carbon on simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(4): 25-28.
- [24] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. *给水排水*, 2010, **36**(11): 125-128.
Yang M, Sun Y L, Zheng X C, *et al.* Denitrification efficiency and techno-economic analysis of different exotic additional carbon source[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, **36**(11): 125-128.
- [25] Chamchoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3331-3336.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, Jilili Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)