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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第1期
2020年1月15日

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 …… 郑庆锋, 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, 程铖, 黎荧, 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, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘焕武, 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, 段菁春, 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, 周崴, 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, 胡磬遥, 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, 张昱, 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, 张益淼 (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, 董伟羊, 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, 缪恒锋, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及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)
一硫代砷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)
脱氮菌剂在低溶解氧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耐性基因 …… 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)
高频曝停下停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, 阮起炀, 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, 丁帮璟, 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, 龙泽华, 闵伟, 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砷空间分布及农作物砷富集特征 …… 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)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第1期 2020年1月
Vol.41, No.1 Jan., 2020

基于间歇饥饿的 SNAD 工艺运行

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

摘要: 在室温下(22℃ ±3℃)用 SBR 反应器运行 SNAD 工艺,通过定期延长系统水力停留时间,营造间歇饥饿环境,探讨间歇饥饿策略下 SNAD 工艺的运行情况. 结果表明,系统经过间歇饥饿运行后,好氧阶段末的NO_3^--N浓度降至 8.72 mg·L^{-1},亚硝酸盐积累率达到 83.18%,表明 NOB 活性得到了有效抑制,实现了亚硝化性能的提高;系统经过间歇饥饿运行后,好氧阶段末的亚氮与氨氮基质的比例得到调整,为后续厌氧氨氧化过程提供了合适底物,使出水氨氮浓度降至 1.0 mg·L^{-1}以下,同时由于出水硝氮浓度降低,总氮去除率达到了 92.07% 左右,系统处理性能提高;通过测定功能菌活性,发现饥饿后亚硝化性能提高的主要原因是饥饿期 AOB 活性衰减速率低于 NOB 及恢复期前期 AOB 活性恢复速率显著高于 NOB.

关键词:同步短程硝化、厌氧氨氧化耦合反硝化(SNAD);间歇饥饿;氨氧化菌(AOB);亚硝酸盐氧化菌(NOB)
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)01-0337-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201908028

Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process

LI Dong[1], LIU Zhi-cheng[1], XU Gui-da[1], WANG Yu-ying[1], ZHANG Jie[1,2]
(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: We report on and discuss the effects of intermittent starvation on the operation of the simultaneous partial nitrification, ANAMMOX, and denitrification (SNAD) process. The SNAD process was carried out in a sequencing batch reactor (SBR) at room temperature (22℃ ±3℃), and the intermittent starvation was achieved by periodically extending the hydraulic retention time (HRT) of the system. The results showed that after the operation of intermittent starvation, the NO_3^--N concentration at the end of the aerobic phase decreased to 8.72 mg·L^{-1} and the NO_2^- accumulation percentage reached 83.18%, which indicated that the nitrite oxidizing bacteria (NOB) activity was effectively inhibited and that the nitritation performance improved. After the operation of the intermittent starvation, the ratio of NO_2^- to NH_4^+-N at the end of the aerobic phase was adjusted to provide more suitable substrates for the subsequent ANAMMOX process, such that the concentration of NH_4^+-N in the effluent fell below 1.0 mg·L^{-1}. At the same time, due to the decrease of the NO_3^- concentration, the total N removal rate reached 92.07%, which indicated that the treatment performance improved. By determining the activity of the functional bacteria, we found that the main reason for the improvement in the nitritation performance after starvation was that the decay rate of the ammonia oxidizing bacteria (AOB) activity during the starvation period was lower than of the decay rate of the NOB activity, and that the recovery rate of the AOB activity during the recovery period was significantly higher than that of the NOB.

Key words: simultaneous partial nitrification, ANAMMOX, and denitrification (SNAD); intermittent starvation; ammonia oxidizing bacteria (AOB); nitrite oxidizing bacteria (NOB)

同步短程硝化、厌氧氨氧化耦合反硝化(simultaneous partial nitrification, ANAMMOX, and denitrification, SNAD)工艺是将亚硝化、厌氧氨氧化和反硝化结合起来的新型脱氮工艺,具有能耗低、污泥产量低等优点[1],因此成为近年来生物脱氮的研究重点. 但该工艺面临的主要问题之一是亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)易增殖,使亚硝化不稳定. 在过去的研究中,通常使用高温[2,3]、高游离氨[4,5]和低溶解氧[6,7]等策略来抑制 NOB,但上述策略存在或能耗高、或不适用于城市污水、或抑制不彻底等问题,因此有必要探索其他亚硝化策略.

有研究表明,硝化系统在闲置饥饿一段时间后,再次启动时会产生亚硝酸盐积累[8~10],这就为利用饥饿期促进亚硝化提供了可能性. 陈佼等[11]将生物膜硝化系统饥饿 20 d 后恢复运行,亚硝酸盐积累率最终能达到 80% 左右;Ye 等[12]对混合活性污泥进行 1 d 的好氧/厌氧交替饥饿,再经过 13 d 运行,亚硝酸盐积累率达到 71%. 但前者采用的饥饿时间较长,而其结果表明,长期饥饿使氨氧化菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)活性亦无法完全恢复、氨氮去除率随之降低[11];后者结合了曝气进行好氧饥饿,而有研究表明,ANAMMOX 菌在好氧条件下衰减十分剧烈[13],因此好氧饥饿较难应用于亚硝化与

收稿日期: 2019-08-03; **修订日期**: 2019-08-25
基金项目: 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910005019)
作者简介: 李冬(1976~),女,博士,教授,主要研究方向为污水再生利用,E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

厌氧氨氧化的耦合工艺.

目前,不结合曝气的短期饥饿策略则鲜有研究,其主要原因是单独短期饥饿策略下 NOB 抑制效果相对减弱,被抑制的 NOB 能在运行一段时间后恢复活性,难以长期抑制,亚硝化不稳定. 基于此,本研究提出了间歇饥饿的思路,即设计"X 天(短期)饥饿+Y 天恢复"的模式循环运行,对 NOB 进行反复抑制,在减少主要功能菌 AOB 及 ANAMMOX 菌活性损失的基础上,将 NOB 逐步淘汰出系统.

本研究采用序批式反应器(sequencing batch reactor,SBR)运行 SNAD 工艺,通过定期延长系统水力停留时间(hydraulic retention time,HRT),营造间歇饥饿环境,探讨间歇饥饿对 SNAD 工艺亚硝化性能、整体脱氮性能及功能菌活性等方面的影响.

1 材料与方法

1.1 实验装置和接种污泥

本实验采用 SBR 反应器,反应器由有机玻璃制成,有效容积为 6.5 L. 采用机械搅拌,反应器底部安装曝气盘进行微孔曝气,通过气体流量计控制曝气量. 反应器的运行通过时控开关进行控制,容积交换率为75%. 反应器接种 1.5 L 已启动的 SNAD 污泥,污泥浓度为4 000 ~ 5 000 $mg \cdot L^{-1}$左右,总氮去除率在 70% ~ 75%.

1.2 实验用水和运行工况

采用人工配水,在进水中添加$(NH_4)_2SO_4$ 和丙酸钠分别提供 100 $mg \cdot L^{-1}$的氨氮和 50 $mg \cdot L^{-1}$的 COD,添加 $NaHCO_3$ 提供无机碳源及调整碱度,保持 pH 在 7.0 ~ 7.5. $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 40 $mg \cdot L^{-1}$,K_2HPO_4 40 $mg \cdot L^{-1}$,$CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 30 $mg \cdot L^{-1}$,微量元素浓缩液Ⅰ、Ⅱ 1.0 $mL \cdot L^{-1}$. 微量元素浓缩液Ⅰ的组成($g \cdot L^{-1}$):EDTA 5,$FeSO_4$ 5;微量元素浓缩液Ⅱ的组成($g \cdot L^{-1}$):EDTA 15,H_3BO_4 0.014, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 0.99, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.25, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.43, $NaSeO_4 \cdot 10H_2O$ 0.21, $NaMoO_4 \cdot 2H_2O$ 0.22, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.24, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.19.

本实验分为 3 个阶段,各阶段具体运行情况如表 1 所示. 反应器正常 SBR 运行时各周期包括进水(5 min)、搅拌(360 min)、沉淀(30 min)和排水(5 min),搅拌期间包括 60 min 的曝气和 300 min 的停曝,曝气速率为 60 $mL \cdot min^{-1}$.

表 1 各阶段运行情况

Table 1 Operating parameters in each stage

阶段		饥饿阶段/d	运行阶段/d	饥饿天数/d	运行天数/d	间歇饥饿周期×周期数
A		—	1 ~ 20	—	20	—
B	B_1	21 ~ 22	23 ~ 29	2	7	—
	B_2	30 ~ 33	34 ~ 48	4	15	—
C	C_1	49 ~ 52	53 ~ 58	4	6	(4 d 饥饿+6 d 恢复)×4
	C_2	59 ~ 62	63 ~ 68	4	6	
	C_3	69 ~ 72	73 ~ 78	4	6	
	C_4	79 ~ 82	83 ~ 88	4	6	
	C_5	—	89 ~ 110	—	22	—

1.3 分析方法

DO、温度、pH 值均采用 WTW 在线测定仪测定;水样分析中NH_4^+-N的测定采用纳氏试剂光度法,NO_2^--N采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法,NO_3^--N采用紫外分光光度法,COD 采用有机物快速测定仪测定;粒径采用 Mastersize2000 型激光粒度仪测定;混合液悬浮固体浓度(MLSS)和挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)采用标准重量法测定;其余水质指标的分析方法均采用国标方法[14].

亚硝酸盐积累率(nitrite accumulation percent, NAP),氨氮去除率(ammonium nitrogen removal rate, ARR),总氮去除率(nitrogen removal rate, NRR)分别按以下公式计算:

$$NAP = \frac{NO_{2\ Aer\text{-}eff}^- \times 100\%}{NO_{2\ Aer\text{-}eff}^- + NO_{3\ Aer\text{-}eff}^-} \quad (1)$$

$$ARR = \frac{[NH_{4\ inf}^+ - NH_{4\ Aer\text{-}eff}^+] \times 100\%}{NH_{4\ inf}^+} \quad (2)$$

$$NRR = \frac{[TN_{inf} - TN_{eff}] \times 100\%}{TN_{inf}} \quad (3)$$

式中,$NH_{4\ inf}^+$表示进水氨氮浓度($mg \cdot L^{-1}$), TN_{inf}和 TN_{eff}分别表示进出水的总氮浓度($mg \cdot L^{-1}$), $NH_{4\ Aer\text{-}eff}^+$、$NO_{2\ Aer\text{-}eff}^-$和 $NO_{3\ Aer\text{-}eff}^-$分别表示好氧阶段结束后的氨氮、亚氮和硝氮浓度($mg \cdot L^{-1}$).

1.4 批次实验

在饥饿和活性恢复阶段,从反应器中取出 100 mL 混合液进行批次实验,测定 AOB、NOB、ANAMMOX 菌及反硝化菌的活性,AOB 和 NOB 活性分别用比氨氧化速率(specific ammonia nitrogen oxidation rate, SAOR)和比亚硝酸盐氧化速率(specific nitrite oxidation rate, SNOR)来表征,

ANAMMOX 菌和反硝化菌活性分别用比厌氧氨氧化速率/活性(specific ANAMMOX activity, SAA)和比反硝化速率/活性(specific denitrification activity, SDA)来表征,测定方法参照文献[15~17],配水组分见表 2. 硝化菌活性具体测定步骤如下:① 将 100 mL 污泥用配水稀释至 400 mL,置于 500 mL 烧杯内,pH 控制在 7.5 左右;②启动磁力搅拌器,转速为 500 $r \cdot min^{-1}$,辅以曝气,DO 控制在(4.00 ± 0.05) $mg \cdot L^{-1}$. 先向体系中加入NO_2^--N,每隔 10 min 取一次样,测定亚氮浓度;③当亚氮不再变化时,再向系统中加入NH_4^+-N,每隔 10 min 取一次样,测定氨氮浓度,直至其不再变化. ANAMMOX 菌及反硝化菌活性的测定方法类似,但不进行曝气、且用保鲜膜密封反应.

对测定的硝化菌活性拟合指数函数,确定其衰减及活化速率,拟合方程由式(4)和式(5)给出[17].

$$b = \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right)}{t_{sd}} \tag{4}$$

$$r = \frac{\ln\left(\frac{F_0}{F_t}\right)}{t_{rd}} \tag{5}$$

式中,R_0 和 R_t 分别是硝化菌在饥饿前和饥饿后的底物氧化速率,F_0 和 F_t 分别是硝化菌在恢复前和恢复后的底物氧化速率,t_{sd}是饥饿时间,t_{rd}是恢复时间,b 是活性衰减速率(d^{-1}),r 是活性恢复速率(d^{-1}).

表 2　测定活性时的主要配水组分/$mg \cdot L^{-1}$

Table 2　Synthetic wastewater of batch tests/$mg \cdot L^{-1}$

功能菌活性	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	丙酸钠
SAOR	30	0	0	0
SNOR	0	30	0	0
SAA	30	40	0	0
SDA	0	0	30	120

2　结果与讨论

2.1　SNAD 工艺亚硝化性能

SBR 系统曝气(好氧)阶段结束时的氮浓度、亚硝酸盐积累率(NAP)及氨氧化率(ARR)如图 1 所示. 阶段 A 中,系统正常 SBR 运行,处理性能相对稳定,好氧阶段末的平均NO_2^--N和NH_4^+-N浓度分别达到 30.01 $mg \cdot L^{-1}$ 和 31.23 $mg \cdot L^{-1}$,两者比例为 0.96,小于厌氧氨氧化过程的理论比值 1.32[18],表明好氧阶段亚氮积累量不足. 分析其原因主要是 NOB 过度增殖,亚硝酸盐氧化过程较活跃,降低了亚硝酸盐积累率(平均仅达到 53.21%),系统亚硝化性能有待提高.

阶段 B 分为 B_1 和 B_2 两个阶段,分别包括 2 d 和 4 d 的饥饿期及其后续重新恢复稳定的运行期. 在 B_1 阶段,饥饿期结束后,好氧阶段末的NH_4^+-N浓度略有提高、NO_3^--N浓度则略有下降,分析其原因可能是饥饿期间外界提供的营养基质不能满足硝化菌生长,其新陈代谢逐渐减弱后进入内源呼吸期[19],期间由于自身氧化而发生衰减[20],使得硝化菌活性下降,因此 AOB 消耗的氨氮底物和 NOB 产生的硝氮产物随之减少. 随着反应器运行,上述参数在运行第 3 d 均基本回到饥饿前水平,表明硝化菌活性得到迅速恢复. 在 B_2 阶段,饥饿期后好氧阶段末的NH_4^+-N和NO_3^--N浓度发生了与上一阶段类似、但更显著的变化,可能是由于饥饿期的延长使硝化菌活性下降更剧烈. 随后,好氧阶段末的NH_4^+-N与NO_3^--N浓度分别经过 4 d 和 8 d 运行基本恢复饥饿前水平,NOB 活性恢复滞后于 AOB,表明 NOB 的活性恢复速率小于 AOB 的活性恢复速率. 与此同时,运行前期系统亚硝酸盐积累率明显提高,且前 6 d 保持在 55% 以上,表明 AOB 与 NOB 活性恢复速率的差异能促进亚硝化性能的提高和维持. 待 NOB 活性完全恢复后,亚硝酸盐积累率重新回到饥饿前水平. 综上所述,与 2 d 饥饿期相比,SNAD 系统经过 4 d 饥饿后亚硝化性能提高更显著,且持续时间更长,但两者均无法淘汰 NOB、维持良好的亚硝化性能. 因此本研究基于上述结果,设计了“4 d 饥饿 + 6 d 恢复”的间歇饥饿模式,对 NOB 进行反复抑制.

C_1 ~ C_4 阶段 SNAD 系统以间歇饥饿模式运行. 其中,各阶段末氨氮浓度均能基本稳定、恢复饥饿前水平,表明 6 d 运行期内 AOB 活性得到恢复,间歇饥饿未对其造成较大影响. 而各阶段末的硝氮浓度相比恢复前略有增长、但未达到饥饿前水平,表明 6 d 运行期内 NOB 活性难以完全恢复、出现一定损失. 在如此反复胁迫下,硝氮浓度整体呈逐渐下降趋势. 至 C_5 阶段,反应器恢复正常运行,好氧阶段末的NO_3^--N浓度平均降至 8.72 $mg \cdot L^{-1}$,表明 NOB 活性得到有效控制,亚硝酸盐积累率随之达到 83.18%,实现了亚硝化性能的显著提高.

2.2　SNAD 工艺脱氮性能

SBR 的出水氮浓度及总氮去除率(NRR)如图 2 所示. 阶段 A 出水中硝氮含量较高,平均达到 19.88 $mg \cdot L^{-1}$,表明 NOB 活性较高. 同时,出水中几乎不含亚氮、含少量氨氮,分析是由于 NOB 过度增殖降低了亚氮积累量,使基质比例偏离厌氧氨氧化理论值,进而造成氨氮不能全部消耗. 总氮去除率受上述制约,仅达到 70% ~ 75%.

在 B_1 阶段中,饥饿期结束后出水氮素没有明显

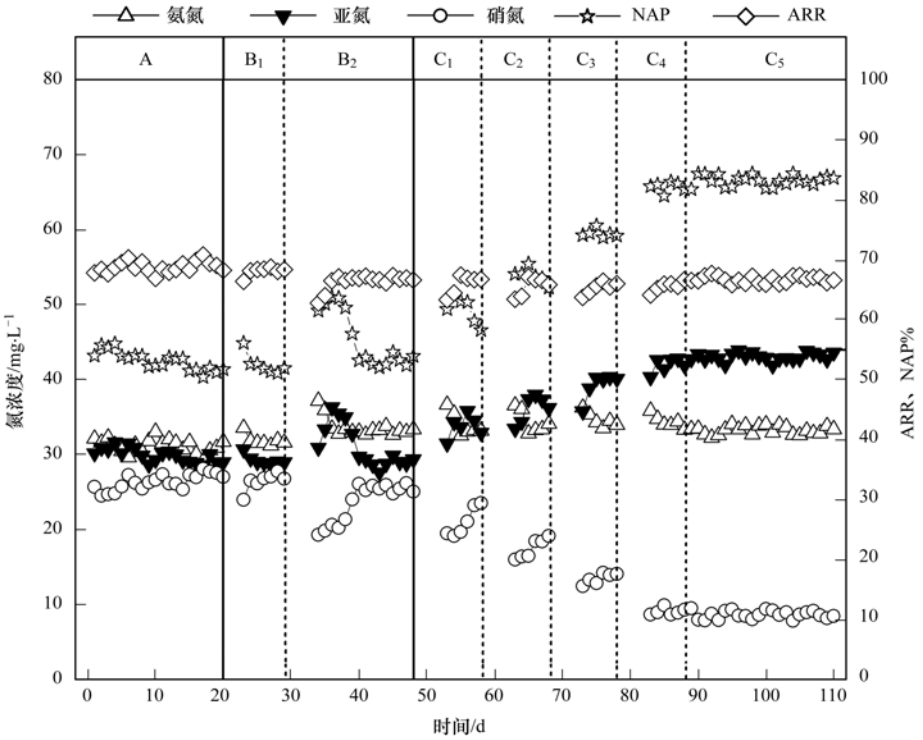

图 1 好氧阶段末氮素变化

Fig. 1 Variations of nitrogen at the end of the aerobic stage

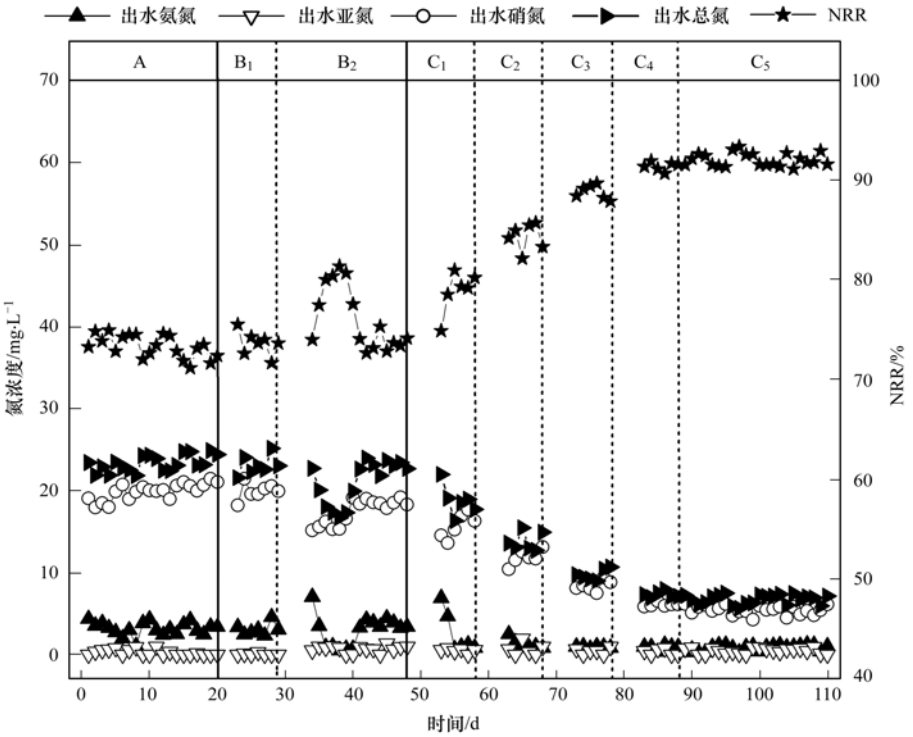

图 2 出水氮素变化

Fig. 2 Variations of nitrogen in the effluent

变化,表明 2 d 饥饿期未对系统造成显著影响. 在 B_2 阶段中,饥饿期结束后,经过短暂运行,出水氨氮逐步实现全部去除,可能是由于亚硝化性能的提高使亚氮与氨氮基质的比例得到调整,更能满足后续反应的需求,实现两者的同步去除. 与此同时,运行前期出水硝氮浓度明显降低,进一步证明饥饿胁迫下 NOB 活性遭受抑制. 基于上述氮素变化,系统总氮去除率有较大提高,峰值达到 81.40%. 但后期可能由于功能菌活性的逐渐恢复,出水氮素重新达到稳定、恢复至饥饿前水平.

在 $C_1 \sim C_4$ 阶段,出水硝氮变化与好氧阶段末的相似,随系统间歇饥饿运行,硝氮浓度整体逐渐下

降. 同时可以看出，从 C_3 阶段开始，出水中氨氮残留的现象消失. 至 C_5 阶段，系统恢复正常运行，出水水质较稳定，总氮平均浓度降至 6.75 mg·L^{-1}，总氮去除率平均达到 92.07%，表明 SNAD 工艺的处理性能得到显著提升. 综上可知，亚硝化性能的改善能使亚硝化过程与厌氧氨氧化过程实现更好地耦合，提高氮去除效果.

2.3　短期饥饿对功能菌活性的影响

图 3 表示硝化菌在 B_2 阶段饥饿期的活性变化. 经过 4 d 饥饿期后，AOB 的底物降解速率（以 N/VSS 计）由 1.13 mg·(g·min)$^{-1}$ 降至 0.74mg·(g·min)$^{-1}$，氨氧化活性降低了 34.5%，NOB 的底物降解速率（以 N/MLSS 计）由 0.89 mg·(g·min)$^{-1}$ 降至 0.51 mg·(g·min)$^{-1}$，亚硝酸盐氧化活性降低了 42.7%，AOB 和 NOB 的活性衰减速率分别为（0.108 ±0.003）d^{-1} 和（0.134 ±0.002）d^{-1}. 分析认为，硝化菌活性下降是由于微生物处在饥饿状态时，因基质匮乏而进行自体氧化、获取能量、以供细胞维持活动[21]，从而造成细胞衰减、活性降低. 且比较上述结果可知，缺氧饥饿下 NOB 的衰减速率高于 AOB 的衰减速率，NOB 对饥饿的敏感性比 AOB 更强，这与 Salem 等[22] 和 Kornaros 等[23] 的研究结果一致. B_2 阶段中饥饿期后的亚氮积累率由饥饿前的 51.96% 增长至 61.51%，表明饥饿期 AOB 与 NOB 衰减速率的差异是促进亚硝化性能短暂提高的原因之一.

表 3 比较了本研究和已有报道中 AOB 和 NOB 的活性衰减速率. 根据以往研究可知缺氧饥饿下硝化菌的衰减速率为 0.08 ~0.17 d^{-1}，而本研究得到的 b_{AOB} 和 b_{NOB} 值均在上述数据范围内，且处于区间偏上的位置. Munz 等[28] 的研究发现衰减速率依赖于具体饥饿条件，如 pH、温度和 DO 浓度等，这些都是 AOB 和 NOB 动力学模型中的动态参数，其中，高温[26]、高溶解氧[24,29] 和低 pH[28] 均能提高硝化细菌的衰减速率. 而比较发现，本研究与其他研究的差别主要表现在 pH 上，本研究采用延长 HRT 的方式营造饥饿期，而经周期实验测定，经过一个 SBR 周期后 pH 值会降至 7.1 左右，因此后续饥饿期 pH 值水平较低，可能加快硝化菌衰减. 另外，本文以 SNAD 污泥为研究对象，亚硝化菌群结构可能存在一定差异，也会对衰减速率产生影响.

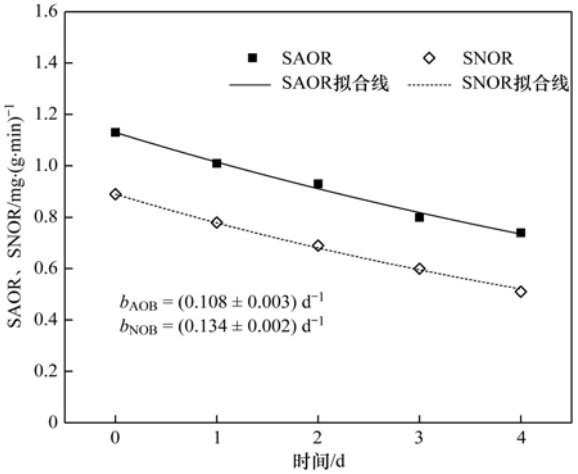

图 3　饥饿期 AOB 和 NOB 的活性变化

Fig. 3　Variations of the activity of AOB and NOB during the starvation period

表 3　本研究和已有报道中 AOB 和 NOB 的衰减速率

Table 3　Decay rates of AOB and NOB under anoxic starvation in other studies and in this study

污泥类型	饥饿条件		饥饿时间/d	衰减速率/d^{-1}		文献
	pH	T/℃		AOB	NOB	
活性污泥	7.5	20 ±1	35	0.10 ±0.05	0.12 ±0.023	[22]
亚硝化污泥	8.5 ~9.0	18 ±2	30	0.11 ±0.01	—	[24]
活性污泥	7.4 ~7.6	20 ±2	30	0.0165	0.037	[25]
硝化污泥	7.4 ~7.6	25 ±1	5	0.090 ±0.005	0.089 ±0.002	[11]
硝化污泥	7.2 ~7.8	25 ±1	10	0.094 ±0.006	0.105 ±0.005	[11]
活性污泥	7.3 ~7.6	20	7	0.10 ±0.05	0.10 ±0.05	[26]
活性污泥	7.5 ~7.9	20	7 ~9	0.097	0.097	[27]
SNAD 污泥	7.0 ~7.2	20	4	0.108 ±0.003	0.134 ±0.002	本研究

图 4 表示硝化菌在 B_2 阶段恢复期的活性变化（其中的拟合曲线是将前 4 d 的数据拟合得到），表 4 表示在 B_2 阶段恢复期第 4 d 和第 7 d 的 AOB 和 NOB 的活性恢复速率. 从中可知，恢复期的前 4 d，AOB 的活性恢复速率（0.110 ±0.004）d^{-1} 明显高于 NOB 的活性恢复速率（0.052 ±0.007）d^{-1}，分析其原因是 AOB 独特的饥饿应对策略能使细胞随时处于预备状态、停止细胞分化等行为，一旦饥饿期结束、底物出现，就能迅速做出反应、并提供细胞生长所需的酶，进而使细胞得到激活，但 NOB 因无法快速适应环境变化，其活性恢复滞后于 AOB[30,31]. 在恢复期第 4 d，AOB 活性已基本恢复，此时 NOB 活性仍不高，从而使得前 4 d 系统亚硝酸盐积累率达到 60% 以上. 随后 NOB 活性开始逐渐恢复，至恢复期第 7 d 时，NOB 活性已基本恢复至饥饿前的水平，其活性恢复速率也提高至（0.071 ±

0.005) d^{-1},更接近于 AOB 的活性恢复速率(0.073 ±0.008) d^{-1}. 而随着 NOB 活性的恢复,系统亚硝酸盐积累率下降,由第 4 d 的 63.62% 降至第 7 d 的 53.25%. 综上可知,恢复期 AOB 与 NOB 活性恢复速率的差异促进了亚硝化性能的短暂提高.

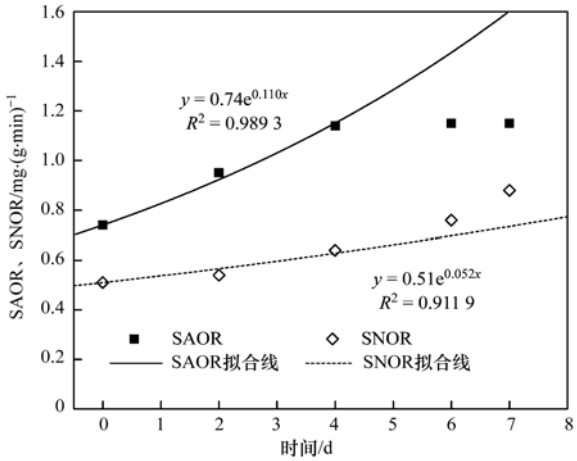

图 4 恢复期 AOB 和 NOB 的活性变化

Fig. 4 Variations of the activity of AOB and NOB during the recovery period

表 4 恢复期 AOB 和 NOB 的活性恢复速率

Table 4 Activity recovery rates of AOB and NOB during the recovery period

恢复时间/d	细菌类型	活性恢复速率 r/d^{-1}
4	AOB	0.110 ±0.004
4	NOB	0.052 ±0.007
7	AOB	0.073 ±0.008
7	NOB	0.071 ±0.005

图 5 反映了 ANAMMOX 菌和反硝化菌在 B_2 阶段饥饿期及恢复期的活性变化. 经过 4 d 饥饿期,SAA(以 TIN/VSS 计)由 0.213 kg·(kg·d)$^{-1}$ 降至 0.203 kg·(kg·d)$^{-1}$,厌氧氨氧化活性降低了 4.7%. 由此可见,厌氧氨氧化活性在短期饥饿内衰减量极小,ANAMMOX 菌对饥饿的敏感性较低. 陈健伟[32]的研究发现,短期内常温下厌氧氨氧化微生物衰减较慢,其衰减速率远小于硝化菌,黄佳路等[33]也提到常温饥饿下,厌氧氨氧化污泥的损伤小,颗粒保持完整,菌体无大量死亡,均与本研究的结果较为符合. 饥饿期结束后,在恢复期第 1d 厌氧氨氧化活性即已恢复至饥饿前的水平. 将其与 NOB 对比可知,ANAMMOX 菌活性受饥饿影响较小,且能迅速恢复,而 NOB 在饥饿期活性下降幅度较大,且恢复较缓慢. 又由于 ANAMMOX 菌与 NOB 存在基于底物和生存空间的竞争关系,因此饥饿期结束后活性保持良好的 ANAMMOX 菌易对 NOB 造成竞争性抑制,这可能是饥饿期后亚硝化性能提高的另一个重要原因. 与此同时,经过 4 d 饥饿期,SDA(以 N/VSS 计)由 0.101 kg·(kg·d)$^{-1}$ 降至 0.058 kg·(kg·d)$^{-1}$,反硝化菌活性下降了 43.6%. 反硝化菌活性在饥饿期下降较为显著,但结合前文的分析可知,其活性改变未对 SNAD 工艺性能表现出明显影响,分析其原因是本实验配水中 COD 浓度较低、C/N 仅为 0.5,反硝化过程的脱氮贡献率较小,且反硝化菌在恢复基质供应后活性能得到较快恢复. 由于有研究表明[17,34,35],短期饥饿下微生物的活性下降主要是由于细菌衰减,而非细菌死亡,因此本研究主要探讨了各功能菌的比活性变化. 但微生物组成和丰度的变化同样值得详细研究,因此此后还需结合 FISH(fluorescence in situ hybridization)等分子生物学方法作进一步探讨.

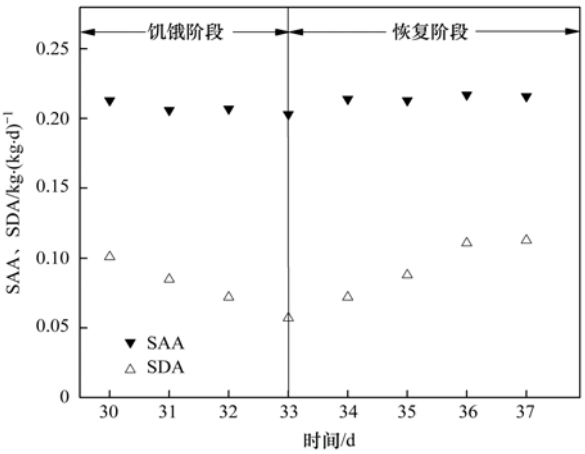

图 5 饥饿期-恢复期内 ANAMMOX 菌及反硝化菌的活性变化

Fig. 5 Variations of ANAMMOX and denitrifying bacteria during the starvation and recovery periods

3 结论

(1)系统经过间歇饥饿运行后,好氧阶段末的 NO_3^--N浓度降至 8.72 mg·L^{-1},亚硝酸盐积累率达到 83.18%,表明 NOB 活性得到了有效抑制,实现了亚硝化性能的提高.

(2)系统经过间歇饥饿运行后,好氧阶段末的亚氮与氨氮基质的比例得到调整,为后续厌氧氨氧化过程提供了合适底物,使出水氨氮浓度降至 1.0 mg·L^{-1}以下,同时由于出水硝氮浓度降低,总氮去除率达到了 92.07% 左右,系统处理性能提高.

(3)通过测定功能菌活性,发现饥饿后亚硝化性能提高的主要原因是饥饿期 AOB 活性衰减速率低于 NOB、及恢复期前期 AOB 活性恢复速率显著高于 NOB.

参考文献:

[1] Chen H H, Liu S T, Yang F L, *et al*. The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal[J].

Bioresource Technology, 2009, **100**(4): 1548-1554.

[2] Hellinga 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.

[3] Hao X D, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Model-based evaluation of temperature and inflow variations on a partial nitrification-ANAMMOX biofilm process[J]. Water Research, 2002, **36**(19): 4839-4849.

[4] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al*. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal of the Water Pollution Control Federation, 1976, **48**(5): 835-852.

[5] Hawkins S, Robinson K, Layton A, *et al*. Limited impact of free ammonia on *Nitrobacter* spp. inhibition assessed by chemical and molecular techniques[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(12): 4513-4519.

[6] 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.

[7] Laanbroek H J, Bodelier P L E, Gerards S. Oxygen consumption kinetics of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter hamburgensis* grown in mixed continuous cultures at different oxygen concentrations[J]. Archives of Microbiology, 1994, **161**(2): 156-162.

[8] Morgenroth E, Obermayer A, Arnold E, *et al*. Effect of long-term idle periods on the performance of sequencing batch reactors[J]. Water Science & Technology, 2000, **41**(1): 105-113.

[9] Elawwad A, Sandner H, Kappelmeyer U, *et al*. Long-term starvation and subsequent recovery of nitrifiers in aerated submerged fixed-bed biofilm reactors[J]. Environmental Technology, 2013, **34**(8): 945-959.

[10] Pijuan M, Werner U, Yuan Z G. Effect of long term anaerobic and intermittent anaerobic/aerobic starvation on aerobic granules[J]. Water Research, 2009, **43**(14): 3622-3632.

[11] 陈佼，陆一新，张建强，等. 饥饿对人工快速渗滤系统硝化性能的影响[J]. 环境科学学报，2018，**38**(12)：4703-4712.
Chen J, Lu Y X, Zhang J Q, *et al*. Impact of starvation on the nitrification performance of constructed rapid infiltration systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(12): 4703-4712.

[12] Ye L H, Li D, Zhang J, *et al*. Start-up and performance of partial nitritation process using short-term starvation[J]. Bioresource Technology, 2019, **276**: 190-198.

[13] 吕晨. 亚硝化-厌氧氨氧化单级完全自养脱氮工艺性能研究[D]. 长春：吉林大学，2014.
Lv C. Performance of single-stage completely autotrophic nitrogen removal via nitritation/anammox pathways[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[14] 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.

[15] Tang C J, Zheng P, Mahmood Q, *et al*. Start-up and inhibition analysis of the Anammox process seeded with anaerobic granular sludge[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2009, **36**(8): 1093-1100.

[16] 郑照明，李军，侯爱月，等. 城市生活污水 SNAD 生物膜脱氮特性[J]. 中国环境科学，2017，**37**(4)：1322-1330.
Zheng Z M, Li J, Hou A Y, *et al*. Nitrogen removal performance of SNAD biofilm cultured by domestic wastewater[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1322-1330.

[17] Hao X D, Wang Q L, Zhang X P, *et al*. Experimental evaluation of decrease in bacterial activity due to cell death and activity decay in activated sludge[J]. Water Research, 2009, **43**(14): 3604-3612.

[18] 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.

[19] 李志华，白旭丽，张芹，等. 基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析[J]. 环境科学，2014，**35**(9)：3492-3497.
Li Z H, Bai X L, Zhang Q, *et al*. Endogenous respiration process analysis of heterotrophic biomass and autotrophic biomass based on respiration map[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3492-3497.

[20] 郝晓地，朱景义，曹亚莉，等. 污水生物处理系统中内源过程的研究进展[J]. 环境科学学报，2009，**29**(2)：231-242.
Hao X D, Zhu J Y, Cao Y L, *et al*. Research progress on endogenous processes in biological wastewater treatment systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(2): 231-242.

[21] Leenen E J T M, Boogert A A, van Lammeren A A M, *et al*. Dynamics of artificially immobilized *Nitrosomonas europaea*: Effect of biomass decay[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1997, **55**(4): 630-641.

[22] Salem S, Moussa M S, van Loosdrecht M C M. Determination of the decay rate of nitrifying bacteria[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, **94**(2): 252-262.

[23] Kornaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(19): 7245-7253.

[24] Torà J, Lafuente J, Baeza J A, *et al*. Long-term starvation and subsequent reactivation of a high-rate partial nitrification activated sludge pilot plant[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(21): 9870-9875.

[25] Yilmaz G, Lemaire R, Keller J, *et al*. Effectiveness of an alternating aerobic, anoxic/anaerobic strategy for maintaining biomass activity of BNR sludge during long-term starvation[J]. Water Research, 2007, **41**(12): 2590-2598.

[26] Siegrist H, Brunner I, Koch G, *et al*. Reduction of biomass decay rate under anoxic and anaerobic conditions[J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(1): 129-137.

[27] Lee Y, Oleszkiewicz J A. Effects of predation and ORP conditions on the performance of nitrifiers in activated sludge systems[J]. Water Research, 2003, **37**(17): 4202-4210.

[28] Munz G, Lubello C, Oleszkiewicz J A. Modeling the decay of ammonium oxidizing bacteria[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 557-564.

[29] Manser R, Gujer W, Siegrist H. Decay processes of nitrifying bacteria in biological wastewater treatment systems[J]. Water Research, 2006, **40**(12): 2416-2426.

[30] Bollmann A, Schmidt I, Saunders A M, *et al*. Influence of starvation on potential ammonia-oxidizing activity and amoA mRNA levels of *Nitrosospira briensis*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(3): 1276-1282.

[31] Liu W L, Yang Q, Ma B, *et al*. Rapid achievement of nitritation using aerobic starvation[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(7): 4001-4008.

[32] 陈健伟. 高效短程硝化和厌氧氨氧化工艺研究[D]. 杭州：浙江大学，2011.

Chen J W. High-rate partial nitrification and anammox processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[33] 黄佳路, 王小龙, 高大文. 常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4687-4695.
Huang J L, Wang X L, Gao D W. Storage and reactivation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sludge at room temperature[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4687-4695.

[34] Reeve P J, Mouilleron I, Chuang H P, *et al*. Effect of feed starvation on side-stream anammox activity and key microbial populations[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **171**: 121-127.

[35] Ma X, Wang Y Y, Zhou S, *et al*. Endogenous metabolism of anaerobic ammonium oxidizing bacteria in response to short-term anaerobic and anoxic starvation stress[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, **313**: 1233-1241.

《环境科学》连续 8 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2019 年 10 月 28 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2019 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2019 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 8 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”.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 1
Environmental Science (monthly) Jan. 15, 2020

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of $PM_{2.5}$ Pollution Evolution in China in Recent 20 Years ····· SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, *et al.* (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016 ····· ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant ····· WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, *et al.* (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, *et al.* (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City ····· YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, *et al.* (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, *et al.* (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China ····· LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, *et al.* (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals ····· HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, *et al.* (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration ····· ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan ····· SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, Jilili Abuduwaili, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake ····· WANG Jing-zhong, LIU Zhuo, WEI Hao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite ····· LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, *et al.* (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(Ⅱ) ····· XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, *et al.* (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water ····· ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, *et al.* (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, *et al.* (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch ····· ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, *et al.* (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR ····· CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, *et al.* (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process ····· LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, *et al.* (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter ····· CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, *et al.* (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitritation Function ····· LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils ····· ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, *et al.* (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation ····· DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, *et al.* (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils ····· SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, *et al.* (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake ····· CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (489)