

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.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

15℃ SBBR 短程硝化快速启动和稳定运行性能

孙艺齐¹, 卞伟², 李军^{1*}, 赵青³, 王文啸¹, 梁东博¹, 吴耀东¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 国家能源集团, 北京 100011; 3. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300110)

摘要: 本文通过控制 C/N 研究了 15℃ 序批式生物膜反应器 (SBBR) 低氨氮污水短程硝化工艺的快速启动和稳定运行性能。结果表明, 启动运行 60 个周期 C/N 为 1.5 时成功快速启动短程硝化, C/N 为 0 和 3 时快速启动失败; 荧光原位杂交和激光共聚焦显微镜联用技术 (FISH-CLSM) 结果表明, 生物膜载体在 C/N 为 1.5 时成功富集氨氧化菌 (AOB), C/N 为 0 和 3 时, 几乎没有 AOB 与亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 的存在; 启动成功的短程硝化在运行过程中可以不加入碳源, 但投加适量的碳源可提升硝化性能, 对短程硝化的稳定运行更有利。本实验在高溶解氧 (DO) (约 9 mg·L⁻¹) 下成功启动短程硝化, 稳定运行过程中平均 DO 维持为 6.5 mg·L⁻¹ 左右, 成功将实现短程硝化的 DO 值从低浓度解离出来。反应器内充足甚至过量的 NH₄⁺-N 可以有效抑制 NOB 的生长, 保证短程硝化的稳定运行。15℃ 工况下, 全量亚硝化工艺更适合处理高氨氮负荷的污水, 而半量亚硝化更适合降解低氨氮污水。

关键词: 碳源; 溶解氧 (DO); 生物膜法; 短程硝化; 序批式生物膜反应器 (SBBR)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2326-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201810233

Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15℃ SBBR

SUN Yi-qi¹, BIAN Wei², LI Jun^{1*}, ZHAO Qing³, WANG Wen-xiao¹, LIANG Dong-bo¹, WU Yao-dong¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. National Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300110, China)

Abstract: In this study, controlled C/N effects on fast start-up and stable performance of partial nitrification process at 15℃ in a Sequenced Batch Biofilm Reactor (SBBR) were investigated. The results showed that partial nitrification successfully fast initiated when C/N was 1.5 but failed when C/N was 0/3 during 60 cycles. Fluorescence in situ hybridization and confocal laser scanning microscope (FISH-CLSM) results showed that ammonia oxidizing bacteria (AOB) was found as the dominant bacteria population when C/N was 1.5. When C/N were 0/3, there were almost no existence of AOB and nitrite oxidative bacteria (NOB). Partial nitrification could be stably achieved without carbon source. However, the addition of an appropriate amount of carbon can effectively improve the nitrification performance, and it is better for the stable operation of partial nitrification. In this experiment, partial nitrification was successfully initiated at high dissolved oxygen (DO) (about 9 mg·L⁻¹) conditions. The average DO was maintained at about 6.5 mg·L⁻¹ during the stable operation, which successfully decoupled partial nitrification from low DO concentration. Excessive residual ammonium concentration in the reactors effectively repressed the growth of NOB and guaranteed the stable operation of partial nitrification. At 15℃, full nitrification was more suitable for sidestream wastewater, while mainstream wastewater was more suitable for partial nitrification.

Key words: carbon source; dissolve oxygen (DO); biofilm method; partial nitrification; sequenced batch biofilm reactor (SBBR)

传统的全程硝化工艺是在氨氧化细菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 的共同作用下, 将氨氮氧化成硝酸盐氮, 短程硝化工艺是通过抑制 NOB 的生长, 在 AOB 的作用下, 将氨氮控制生成在亚硝酸盐氮^[1], 短程硝化不仅节省反应时间, 还节省约 25% 的曝气量^[2, 3]。近年来, 短程硝化作为多种工艺的前置处理工艺被广泛关注^[4~6]。

短程硝化实现和维持的手段主要有: 高温、高 pH、高游离氨 (FA)、高游离亚硝酸 (FNA)、适宜的水力停留时间 (HRT)、低 DO 等^[7~9], 其调控机理是使 AOB 活性高于 NOB。近年来, 短程硝化工艺多应用于处理垃圾渗滤液、消化液等高氨氮污水中^[10, 11], 而低氨氮污水的短程硝化相对难以实现。

另外低温一直是短程硝化工艺中的研究难点, 在寒冷的冬季, 污水水温一般在 12~14℃^[12], 因此研究低温低氨氮污水短程硝化的启动与长期稳定运行十分有实际意义。低温条件下相对于抗冲击负荷能力差, 易解体的活性污泥, 抗冲击负荷强的生物膜法更有优势^[13]。对于生物膜法, 挂膜成功是具有硝化性能的基础, 硝化反应从原理上不需要碳源, 但实际的生活污水中有机碳源是主要的污染物之一,

收稿日期: 2018-10-30; 修订日期: 2018-12-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07103-001)

作者简介: 孙艺齐 (1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水短程硝化启动、破坏及稳定运行, E-mail: 1037902374@qq.com

* 通信作者, E-mail: jgljun@bjut.edu.cn

探究有机碳源对低温短程硝化的影响同样具有现实意义. 同时, 市政污水中低氨氮浓度直接影响 AOB 的生长, 因此反应器内能够保证短程硝化稳定运行的最低氨氮浓度值得探究. 文献[14]指出活性污泥法中常控制低 DO 浓度使 AOB 增长速率高于 NOB, 生物膜法能否将 DO 从低浓度中解离出来值得关注. 温度小于等于 15℃, NOB 的氧亲和力大于 AOB^[15], 如何在 15℃ 探寻出抑制 NOB 的控制方法, 实现短程硝化的稳定运行值得研究. 本文采用 SBBR 工艺通过控制反应器内碳源浓度、高 DO 浓度、氨氮浓度来研究 15℃ 低氨氮污水短程硝化的启动和稳定运行. 主要目的: ①探究 C/N 对 15℃ 短程硝化快速启动和稳定运行的影响; ②从生物膜法中解离低 DO 限制; ③探究反应器内氨氮浓度对短程硝化影响. 通过本实验利用污水厂采用短程硝化为前置反应工艺处理低温实际生活污水提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

3 个相同的 SBBR 反应器(R1、R2、R3), 长、宽、高分别约为 180、120、260 mm, 有效工作容积约为 4 L(见图 1), 整个实验装置还包括定时搅拌器, DO 探头, pH 探头, 水质分析仪(WTW), 低温恒温槽(型号 DC-0516), 精确曝气装置. 鲍尔环作为反应器的载体, 约占整个工作容积的 22%.

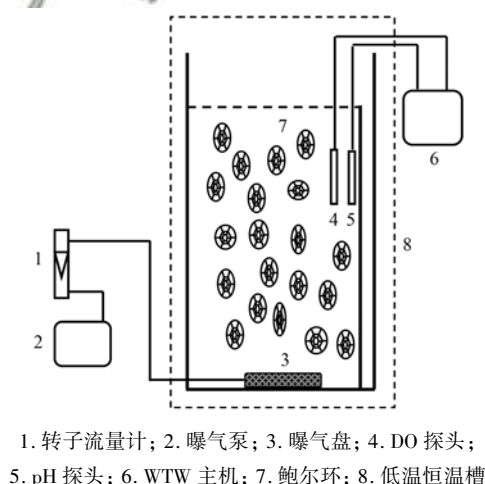


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic drawing of experimental device

1.2 实验水质

SBBR 反应器(R1、R2、R3)采用人工配水, 进入反应器的水质为: 氨氮由氯化铵(NH_4Cl)提供质量浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 由醋酸钠(CH_3COONa)提供, 其中 R1($\text{C/N}=0$)中 COD 浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, R2($\text{C/N}=1.5$)中 COD 浓度为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, R3(C/N

$=3$)中 COD 浓度为 $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, P 由磷酸二氢钾(KH_2PO_4)提供质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 接种污泥均来自北京高碑店污水处理厂曝气池, 其硝化性能良好, f 值在 0.7 左右, SVI 值在 90 左右, 3 个反应器的启动温度均在 15℃.

1.3 水质检测

NH_4^+-N : 纳氏试剂分光光度法; NO_2^--N : N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO_3^--N : 麝香草酚分光光度法; DO、pH 和 T 采用在线探头检测(WTW, 德国). 定义亚硝酸盐氮积累率为 $\text{NAR}(\%) = 100\% \times \text{NO}_2^--\text{N} / (\text{NO}_2^--\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N})$, 氨氮氧化率 $\text{AAR}(\%) = 100\% \times (\text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{进水}} - \text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{出水}}) / \text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{进水}}$, 其中 NO_3^--N 、 NO_2^--N 均指由 NH_4^+-N 氧化而来的部分. 本实验中采用氨氮去除率(AAR)达到 50% 作为硝化性能良好的指标参数, 采用亚硝态氮积累率(NAR)达到 90% 作为评价亚硝化启动成功、稳定运行和破坏修复效果的指标参数. MLSS、MLVSS: 超声波(45 kHz, 120 W, 2~3 min)剥落生物膜, 离心(10 000g, 15 min), 后重量法测量. 反应器启动阶段以周期为单位进行水质检测, 运行阶段以天为单位进行水质检测.

1.4 生物膜分析

生物膜分析中采用荧光原位杂交技术(FISH)和共聚焦激光显微镜技术(CLSM)测量生物膜厚度、分析生物膜内总菌、AOB 和 NOB 的空间分布规律^[16]. 实验中所得样品胞外聚合物(EPS)的测定通过蛋白质(PN)、多糖(PS)值来代表 EPS 含量: PN 采用考马斯亮蓝法, PS 采用蒽酮法.

2 结果与讨论

2.1 15℃ 反应器运行工况

反应初期, 在 3 个反应器中各加入接种污泥 2 L, 再加入人工配水 2 L, 每个反应器中加入等量的鲍尔环, 填充率约是反应器有效工作容积的 22%, 低温恒温槽温度控制在 15℃. 将转子流量计流量调至最大进行闷曝 48 h, 50% 排泥排水, 然后按此种方式运行一周后, 将接种污泥全部排掉, 以 4L 的配水进行运行. 3 个反应器的曝气时间控制 12 h 为一周期.

2.1.1 短程硝化的快速启动

反应器运行初期(周期: 0~14), 为满足理论碱度需求在 3 个反应器中均加入恰好可以完全消耗 NH_4Cl 的 NaHCO_3 , 运行 14 个周期, DO 高达 $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 8.8~8.9. 从图 2 可知: 3 个反应器 AAR 都低于 20%, 没加碳源的 R1 反应器 AAR 低于 10%, 这可能是由于反应初期生物量较少, 硝化

性能较差,无法消耗所提供的碱度,并且由于碱度过高,也抑制硝化细菌的生长,因此从第15个周期开始,3个反应器均不加 NaHCO_3 ,R2的pH逐渐降低维持在8.3左右,DO也随着反应器的运行周期逐渐降低,平均DO为 $6.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第37个周期,NAR超过50%,第48个周期,AAR达到50%,NAR为88.79%,在硝化性能良好的同时,成功实现短程硝化,继续运行至第60个周期,AAR达到57%左右,NAR可保持在95%.R1和R3的pH却没有明显变化,R1 8.5左右,R3大约8.7,DO也一直维持在较高水平,R1的DO大约 $8.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,R3的DO在 $8.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,运行至第60个周期,R1中AAR始终小于20%,几乎没有亚硝酸盐积累,R3在第45~60周期中,AAR维持在25%,NAR在10%左右,R1、R3短程硝化启动失败.

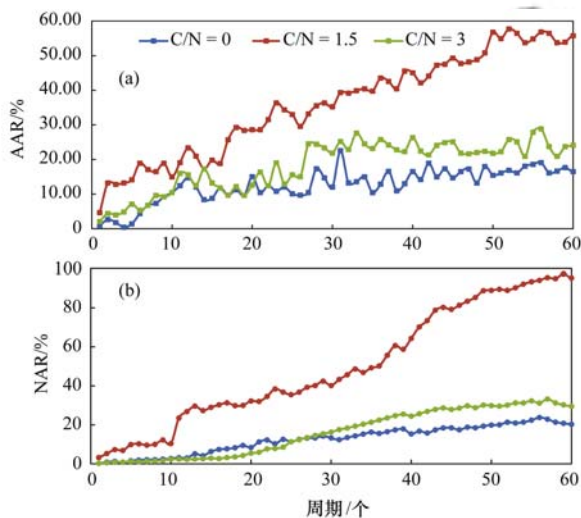


图2 15°C下3个反应器亚硝化的快速启动

Fig. 2 Quick start of nitrification process at 15°C in three reactors

2.1.2 短程硝化的破坏

R2短程硝化启动成功稳定运行一个月后,进行C/N对15°C短程硝化稳定运行小试.R2反应器中鲍尔环平均分成3份,各加入有效工作容积为2

L的B1、B2、B3烧杯反应器中(配水水质和DO分别与R1、R2、R3相同),并将B1、B2、B3的HRT延长至24h进行连续批次小试实验.从图3和图4可以看出,运行约50d后,B1的AAR约80%,NAR为4.26%,短程硝化完全破坏;B2运行60d后,AAR高达98.65%,NAR为7.23%,短程硝化稳定运行失败,B3只运行了30d,AAR一直在60%左右,NAR逐步降至5.23%,短程硝化稳定运行破坏.

2.1.3 短程硝化的恢复

将B1和B2采用缩短HRT至12h的方法进行恢复,结果发现:B1运行60d后,NAR达到75%,但AAR低于40%,为此在第80d加入少量碳源(C/N=0.5),继续运行至120d,NAR达到85%,AAR保证在57%左右,反应器内氨氮浓度约为 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,短程硝化恢复;B2运行50d,NAR达到90.34%,短程硝化成功恢复,此时反应器内氨氮为 $25.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;B3 C/N调回1.5,HRT调回12h进行短程硝化恢复,从图3和图4可以看出,经过80d NAR达到82.34%,持续运行,NAR可以保证在90%以上,短程硝化恢复,在此运行过程中AAR一直保持在55%左右,即反应器内氨氮浓度约为 $27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.1.4 短程硝化的持续运行

为保证小试实验的准确性,又将B1、B2反应器HRT延长至24h,考虑到如果以NAR降低到10%作为短程硝化完全破坏再进行恢复所需的时间太久,此阶段小试将NAR约为65%作为短程硝化破坏严重的标志(达到65%,即将HRT调回12h),从图3和图4可知此阶段实验结果趋势和之前相同,验证实验结果的准确性.另外此阶段破坏和恢复所需的时间较上一阶段小试达到同样结果的时间有所缩短,分析由于反应器从启动至今已经超过4个月,较上一阶段鲍尔环生物量由 $970\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $1890\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,生物量的增加促使硝化性能提高,

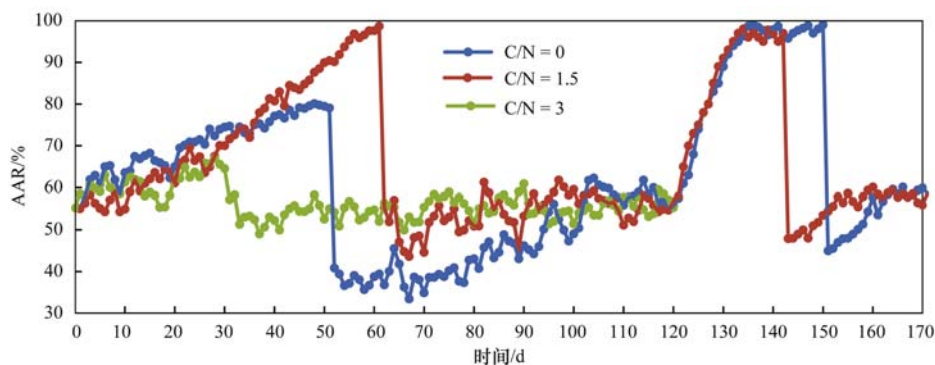


图3 15°C下3个反应器内AAR变化情况

Fig. 3 AAR in three reactors

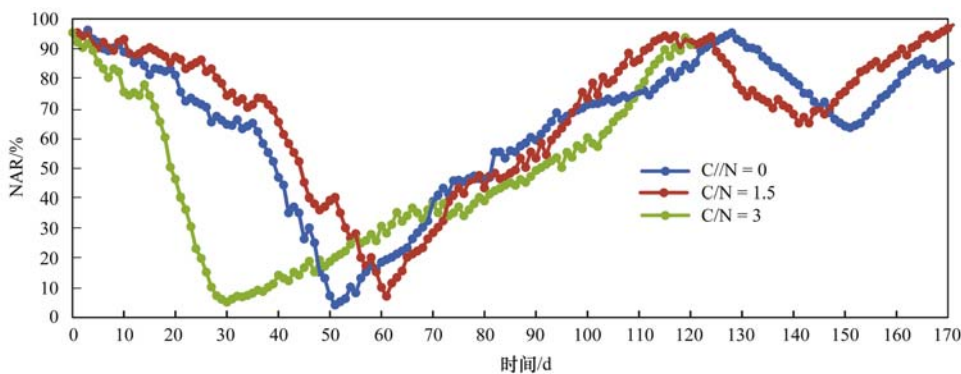


图4 15℃下3个反应器内 NAR 变化情况

Fig. 4 NAR variation in three reactors at 15℃

缩短反应时间.

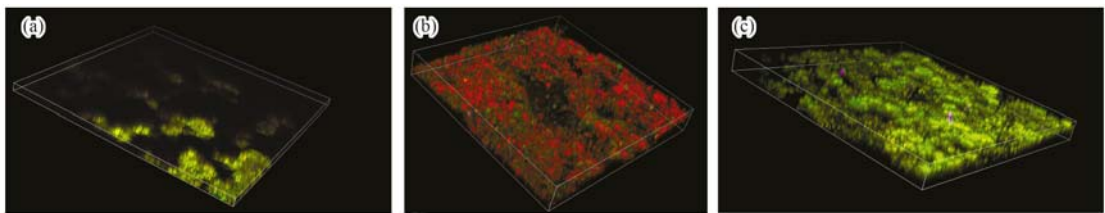
2.2 碳源对 15℃ SBBR 工艺短程硝化性能的影响分析

传统观点认为:硝化细菌为化能自养型微生物,参与硝化反应时不需要外加碳源,但目前已有实验证明碳源的加入能够启动和稳定运行短程硝化,并且在常温条件下,加入适量的碳源有利于短程硝化的稳定运行^[17, 18]. 为探究碳源对 15℃ 短程硝化启动和稳定运行的影响,本研究进行了不加碳源、加入适量碳源、加入过量碳源的实验.

2.2.1 碳源对 15℃ 短程硝化快速启动的影响分析

15℃, 在 R1、R2 和 R3 反应器中各加入 C/N 为 0、1.5 和 3 的人工配水启动 SBBR 工艺短程硝化,运行 60 个周期后,只有 R2 成功启动短程硝化,R1 和 R3 均失败. 通过观察鲍尔环形态发现,R1 中鲍尔环与刚加入反应器时相差不多,但是颜色呈现淡黄色,运行 60 个周期,FISH-CLSM 结果中[图 5(a)]中几乎没有发现 AOB 和 NOB 的存在,有效膜厚大约 15 μm;因此 C/N 为 0 时短程硝化启动失败是因为传统的“闷曝”挂膜方式没有优势,低温下“闷曝”没有让活性污泥中的细菌与鲍尔环强力结合,当污泥全部排出后,反应器中硝化细菌受温度影响生长缓慢,附着在鲍尔环载体上的硝化细菌极少且活性较低,并且分泌的 EPS 量低,所以细菌彼此之间很难依靠附着力结合生长. 反应器内无法消耗提供的 DO 和 NaHCO₃, DO 和 pH 一直较高,

反应器内消耗的 NH₄⁺-N 几乎可以认定为由高 pH 产生的吹脱作用和少量硝化细菌发生的硝化反应,硝化反应消耗的 NH₄⁺-N 极少,反应器运行 60 周期依旧无法实现短程硝化. R2 中鲍尔环上生物膜呈黄色,FISH-CLSM 检测厚度约为 45 μm,FISH-CLSM 结果[图 5(b)]显示,R2 载体上附着的生物膜中存在 AOB 和 NOB,AOB 含量丰富,是膜内的优势细菌;R3 鲍尔环中生物膜较厚呈现黄褐色,FISH-CLSM 检测厚度约为 70 μm,FISH-CLSM 结果[图 5(c)]中发现少量 AOB 的存在,NOB 存在不明显.R3 中 C/N 为 3,没有实现短程硝化在于加入的碳源过量导致异养菌大量繁殖,图 6 为 R2 和 R3 反应器运行第 60 周期的 COD“沿程(随时间变化)”结果,C/N 为 3 时运行 2 h,COD 降解 80 mg·L⁻¹. Liu 等^[19]的研究发现在 30℃ 时,在加入碳源的颗粒污泥反应器中,异养反硝化细菌的生长速率是好氧硝化细菌的 4~7 倍,不过快速生长的异养细菌不会抑制硝化细菌的生长^[20],但在短时间内异养菌会占据鲍尔环上的大量空间,生长缓慢的硝化细菌在空间竞争上落于下风,在鲍尔环上生长生存的极少,虽然大量繁殖的异养菌可以分泌出较多的 EPS 具有黏着性^[21],硝化细菌本可以和分泌的 EPS 结合附着在异养菌上生长,但反应器中鲍尔环一直处于动态旋转,并且在高 DO 的曝气冲击条件下,导致大量生物膜脱落,所以硝化细菌很难附着生长. 因此运行 60 周期,R3 也没有实现短程硝化.



绿色:总菌;红色:氨氧化细菌;紫色:亚硝酸盐氧化细菌

图5 FISH-CLSM 照片

Fig. 5 FISH-CLSM images

因此在 15℃, 反应器中不加碳源(C/N 为 0)和加入较多碳源(C/N 为 3)均不能启动短程硝化. 反观 R2 中加入了适量的碳源, 一方面异养细菌的繁殖速率与数量会低于 R3(从图 6 可知, 2 h 内 COD 只降解 30 mg·L⁻¹; 并且第 40 d R2 中 EPS 为 24.16 mg·g⁻¹ R3 中 EPS 为 41.25 mg·g⁻¹), 鲍尔环中会留存一定的空间, 能够生长在鲍尔环上的硝化细菌会和异养菌分泌的 EPS 结合, 附着力增强, 硝化细菌不会轻易脱落随出水流失导致生物量降低细菌不断生长, FISH-CLSM 结果也证明 R2 鲍尔环上附着的生物膜中 AOB 含量丰富, 是膜内的优势细菌, 因此短程硝化启动成功.

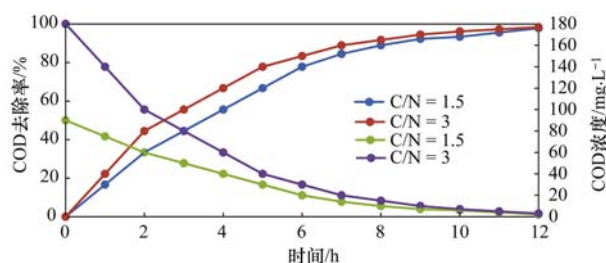


图 6 15℃下反应器内 COD 变化情况

Fig. 6 COD variation in reactors at 15℃

2.2.2 碳源对 15℃短程硝化运行的影响分析

B1 延长 HRT 至 24 h, 经过 50 d 时反应器内氨氮浓度为 12 mg·L⁻¹, NAR 为 4.26%, 短程硝化性能才被完全破坏, 说明生物膜抗冲击能力较强; 缩短 HRT 后, 60 d, NAR 达到 85%, 短程硝化性能恢复, B1 小试是在已经稳定运行短程硝化的反应器中以不外加碳源方式进行实验, 不同于 15℃启动时碳源必须存在, 在运行过程中, 反应器中可以不加入碳源, 不过不加入碳源的反应器生物膜附着力较弱, 易脱落, 导致大量微生物随出水流失, 反应器内生物量减少, 硝化性能降低, AAR 一直低于 40%. 因此第 80 d 加入少量碳源(C/N = 0.5)促进异养菌生长分泌 EPS 结合硝化细菌, 硝化性能逐渐上升, 第 120 d AAR 稳定在 57%. B3 延长 HRT 为 24 h 同时增加碳源至 C/N 为 3, AAR 一直维持在 55%左右. 分析原因: 虽然 B3 内平均 DO 约为 6.5 mg·L⁻¹, 最低 DO 也有 5 mg·L⁻¹, 但由于碳源过多, 导致在反应初期 DO 被 COD 消耗, 硝化细菌能够利用的 DO 极少, 所以 AAR 几乎没有增加, 而大量生长的异养细菌结合到生物膜上, 使生物膜变厚, 阻碍了 DO 在生物膜内的氧传质, 另外膜内部存在缺氧区, 在碳源充足的条件下, 极易发生反硝化, 无法形成亚硝酸盐氮积累, 短程硝化稳定运行失败; C/N 降为 1.5 并缩短 HRT 为 12 h, 持续运行 90 d, AAR 稳定在 55%左右, NAR 保持 90%以上,

短程硝化恢复, 从 C/N 为 3 实验中可以看出, 碳源过量不利于短程硝化的启动和稳定运行, 并且添加过量的碳源导致反应器内短程硝化性能破坏易恢复难. B2 延长 HRT 至 24 h, 经过 60 d, 出水氨氮低于 1.2 mg·L⁻¹, 仍有少量亚硝酸盐氮积累, 缩短 HRT 后, 经过 50 d, NAR 恢复到 90%, 相比于 B1, B2 短程性能破坏更慢, 恢复更快, 说明碳源的存在有利于短程硝化的维持, 虽然在 15℃短程硝化运行中, 可以没有碳源的存在, 但加入适量的碳源使 AAR 增加, 短程硝化运行更加稳定.

2.3 过量氨氮对 NOB 的有效抑制

SBBR 不仅在运行操作上易于控制, 更重要的是其运行模式相当于一个时间上的推流反应器, Zheng 等^[22]提出, 推流式反应器相比于完全混合式反应器, 更易实现短程硝化. 在推流式反应器中, 随着反应逐步运行, 基质浓度逐渐降低, 典型 A₂O 工艺, 在不同隔层内存在不同的优势细菌^[23]. 根据米门公式与莫诺方程^[24], 当反应器内反应基质浓度远远大于 K_s 时, 反应速率、微生物的生长速率与底物浓度无关, 因此保证充足的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度是短程硝化反应发生的前提. 而 SBRR 充分利用其在时间上的推流运行模式, 反应运行初期, 不同于完全混合式反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 并存, SBRR 内反应基质只有 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 不仅保证只进行短程硝化反应, 还使 AOB 的生长速率大于 NOB 的生长速率, 抑制 NOB 生长. 但随着反应持续运行, 反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐减弱, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐增加, 反应器内较低的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度导致 AOB 反应基质缺失, 而此时反应器内 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 充足, 具有较强活性的 NOB^[25], 会将 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 氧化成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 破坏短程硝化, 因此保证反应器内充足的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度并且抑制 NOB 的生长是短程硝化稳定运行的关键因素. 图 3 和图 4 中 AAR 维持在 55%左右(反应器内浓度约为 27 mg·L⁻¹), NAR 可以保证在 85%以上, 但当 AAR 大于 55%并逐渐上升时, 亚硝酸盐氮积累就会随着 AAR 增加明显破坏, 这说明当反应器内氨氮浓度低于一定数值, NOB 的活性就会高于 AOB, 而在本实验中使反应器内氨氮浓度高于 27 mg·L⁻¹, 就会对 NOB 产生有效抑制, 保证 85%以上的亚氮积累, 维持短程硝化的稳定运行. 该实验结果与 Isanta 等^[14]曾利用 AQUASIM 软件提出连续流反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度若高于 32 mg·L⁻¹(AAR 在 55%左右), 会抑制 NOB 的生长, 有利于短程硝化的稳定情况相似.

GU 等^[26]曾采用实时控制的方法, 在氨谷点停

止曝气, 即当反应器中的 NH_4^+-N 恰好完全氧化成 NO_2^--N 时, 停止曝气, 排水进入下一个周期, 如此往复, 实现短程硝化的稳定运行, 此方法的不足之处在于对自控系统的精确要求, 其提出的氨谷点不是一直保持不变的, 一旦外界环境改变, 氨谷点发生变化, 自控系统如果不是极其敏锐, 很有可能造成过度曝气而破坏短程硝化的情况. 而将反应器 AAR 控制在 55% 左右时, 此点不仅易于实现, 还能够随时应对过度曝气带来的隐患, 保证短程硝化的稳定运行.

2.4 从短程硝化中解离低 DO

短程硝化实现的关键在于富集 AOB, 淘洗 NOB. Ciudad 等^[27]指出实现亚硝化的 DO 应小于 $1.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Lauren 等^[28]在 DO 为 $0.15 \sim 0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的反应器中成功实现短程硝化, 传统观点认为 AOB 的氧饱和系数为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NOB 的氧饱和系数为 $1.2 \sim 1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[29], 因此控制低 DO 浓度是实现短程硝化的关键因素, 本实验以 SBBR 方式启动运行, 在整个实验阶段一直维持较高的 DO (平均 DO 为 $6.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 本不利于短程硝化的实现和稳定运行. 而本实验成功解离低 DO, 实现短程硝化稳定运行的关键在于保证反应器中氨氮浓度能够有效抑制 NOB 生长, 2.3 节的实验结果已经证明对于 SBBR, 基质“滞后性”原理, 让反应器在初始条件下就有实现短程硝化的优势, 另外只要通过控制 AAR 在 55% 左右 (出水氨氮浓度在 $27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 就可保证反应器内的基质浓度维持稳定的短程硝化, 而不受 DO 浓度的影响.

2.5 全量亚硝化和半量亚硝化的选择

目前短程硝化工艺分为全量亚硝化与半量亚硝化 2 种, 后续处理可接反硝化工艺和厌氧氨氧化工艺. 全量亚硝化要求氨氮去除率接近 100%, 而半量亚硝化则大约 57%, 因此无论是全量亚硝化还是半量亚硝化, 对于氨氮去除率都有要求, 如果无法保证氨氮去除率, 短程硝化作为前置处理工艺的要求就无法实现. 从本文实验情况来看, 高氨氮污水更适合采用全量亚硝化, 高氨氮污水浓度相对较高, 一般为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 虽然低温条件下, 硝化性能受温度影响, 硝化速率时常较低, 但通过增大 DO、延长 HRT 方法可以保证 AAR 在 95% 以上, 实现全量亚硝化, 并且若后续反应接厌氧氨氧化工艺, 则将全程亚硝化的出水按照固定比例与废水混合即可; 对于低温低氨氮污水则适合采用半量亚硝化, 目前市政污水多为低氨氮污水, 由于其进水氨氮浓度低, AAR 很容易达到 50%, 在 AAR 约为 55% 时, NAR 可以保证在 85% 以上 ($\text{C}/\text{N} = 1.5$),

而半量亚硝化的 AAR 大约 57%, 通过计算, 进水为氨氮浓度 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NAR 保证在 80% 左右, 就可以满足厌氧氨氧化对于 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_2^--\text{N}$ 约为 1.32 的要求, 而若是低氨氮污水采用全量亚硝化存在问题在于, AAR 接近 100%, 反应器内的 NH_4^+-N 浓度过低, 无法保证亚硝化的稳定运行, 亚硝化性能破坏, 无法接厌氧氨氧化工艺, 而对于反硝化工艺, 15℃ 短程硝化速率低, 反硝化速率也低, 在增加基建费用的同时, 还需外加碳源, 增加能耗, 难以实现经济效率.

3 结论

(1) 15℃ 条件下, 反应器运行 60 个周期后, $\text{C}/\text{N} = 1.5$ 成功快速启动和稳定运行 SBBR 工艺短程硝化, 但 $\text{C}/\text{N} = 0$ 和 3 时, 短程硝化快速启动失败; 短程硝化运行阶段可以不加碳源, 但投加适量的碳源可提升硝化性能, 对短程硝化的稳定运行更有利.

(2) 15℃ SBBR 内氨氮浓度超过 $27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (AAR 约为 55%), 能够有效抑制 NOB 的生长; 并且可以在高 DO (平均 DO 为 $6.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下启动并且稳定运行短程硝化.

(3) 相比于全量亚硝化, 15℃ 低氨氮浓度污水采用半量亚硝化更能保证亚硝化工艺的 stable 运行.

参考文献:

- [1] 赵昕燕, 卞伟, 侯爱月, 等. 季节性温度对短程硝化系统微生物群落的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1366-1374.
Zhao X Y, Bian W, Hou A Y, et al. Characteristics of microbial community structure in the stable operation of the partial cut nitrification system with seasonal temperature [J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1366-1374.
- [2] Bian W, Li J, Hou A Y, et al. Rapidly startup of partial nitrification in sequencing batch reactor and microbiological analysis[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(44): 21062-21070.
- [3] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 不同曝气方式 SBR 短程硝化试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 2120-2129.
Su D X, Li D, Zhang X J, et al. Study on partial nitrification with different aeration modes in sequencing batch reactor [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 2120-2129.
- [4] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 温度对短程硝化反硝化的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 516-520.
Shang H L, Peng Y Z, Zhang J R, et al. The effect of temperature on short-cut nitrification and denitrification [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(3): 516-520.
- [5] 李芸, 熊向阳, 李军, 等. 膜生物反应器处理晚期垃圾渗滤液亚硝化性能及其抑制动力学分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 419-427.
Li Y, Xiong X Y, Li J, et al. Performance of nitrification process in membrane bioreactor for old landfill leachate and analysis of

- inhibition kinetics[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36** (2): 419-427.
- [6] 陈翰, 马放, 李昂, 等. 低温条件下污水生物脱氮处理研究进展[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(8): 37-43.
- Chen H, Ma F, Li A, *et al.* Research progress in biological nitrogen removal from wastewater under low temperature condition [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(8): 37-43.
- [7] Rathnayake R M L D, Oshiki M, Ishii S, *et al.* Effects of dissolved oxygen and pH on nitrous oxide production rates in autotrophic partial nitrification granules [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **197**: 15-22.
- [8] Zekker I, Rikmann E, Tenno T, *et al.* Modification of nitrifying biofilm into nitrifying one by combination of increased free ammonia concentrations, lowered HRT and dissolved oxygen concentration[J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2011, **23**(7): 1113-1121.
- [9] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(1): 335-342.
- [10] Ganigué R, Volcke E I P, Puig S, *et al.* Systematic model development for partial nitrification of landfill leachate in a SBR [J]. *Water Science & Technology*, 2010, **61**(9): 2199-2210.
- [11] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- Zhao Z R, Ma B, Zhang S J, *et al.* Comparing microbial community of high ammonia wastewater and municipal sewage in a partial nitrification system[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [12] 傅金祥, 王颖, 孙铁珩, 等. 低温条件下 SBR 系统中短程硝化研究[J]. *水处理技术*, 2008, **34**(7): 29-32.
- Fu J X, Wang Y, Sun T Y, *et al.* Study on shortcut nitrification in SBR system at low temperature [J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, **34**(7): 29-32.
- [13] 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 等. 活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比[J]. *环境科学*, 2017, **38** (12): 5222-5228.
- Sun Y Q, Bian W, Wang M, *et al.* Comparison of start-up and stable performance of nitrification in activated sludge and biofilm processes in a SBR[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5222-5228.
- [14] Isanta E, Reino C, Carrera J, *et al.* Stable partial nitrification for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor[J]. *Water Research*, 2015, **80**: 149-158.
- [15] Farabegoli G, Hellinga C, Heijnen J J, *et al.* Study on the use of NADH fluorescence measurements for monitoring wastewater treatment systems[J]. *Water Research*, 2003, **37**(11): 2732-2738.
- [16] 赵青, 卞伟, 李军, 等. DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1278-1285.
- Zhao Q, Bian W, Li J, *et al.* Characteristics of biofilm during the transition process of complete nitrification and partial nitrification[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1278-1285.
- [17] 赵青, 卞伟, 李军, 等. DO/NH₄⁺-N 调控实现 MBBR 工艺生活污水短程硝化[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4511-4517.
- Zhao Q, Bian W, Li J, *et al.* DO/NH₄⁺-N control to achieve partial nitrification of municipal wastewater in MBBR process [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (12): 4511-4517.
- [18] Bao R L, Yu S L, Shi W X, *et al.* Aerobic granules formation and nutrients removal characteristics in sequencing batch airlift reactor (SBAR) at low temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2-3): 1334-1340.
- [19] Liu Y W, Peng L, Guo J H, *et al.* Evaluating the role of microbial internal storage turnover on nitrous oxide accumulation during denitrification[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15138.
- [20] 刘强. 有机碳对硝化作用及其菌群结构的影响[D]. 成都: 四川大学, 2007.
- Liu Q. Effect of organic carbon on nitrification efficiency and community composition [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [21] 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 等. 生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程[J]. *环境科学*, 2017, **38** (4): 1536-1543.
- Fu K M, Zhou H T, Su X Y, *et al.* Short-cut nitrification recovery and its transformation into CANON process in a biofilm reactor[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1536-1543.
- [22] Zheng Z M, Li Z B, Ma J, *et al.* The nitrification performance of biofilm reactor for treating domestic wastewater under high dissolved oxygen[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **42**: 267-274.
- [23] 曾薇, 李磊, 杨莹莹, 等. A²O 工艺处理生活污水短程硝化反硝化的研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(5): 625-632.
- Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Short-cut nitrification and denitrification in A²O process treating domestic wastewater[J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(5): 625-632.
- [24] 彭永臻, 孙洪伟, 杨庆. 短程硝化的生化机理及其动力学[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(5): 817-824.
- Peng Y Z, Sun H W, Yang Q. The biochemical reaction mechanism and kinetics of partial nitrification[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(5): 817-824.
- [25] 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.
- [26] Gu S B, Wang S Y, Yang Q, *et al.* Start up partial nitrification at low temperature with a real-time control strategy based on blower frequency and pH[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **112**: 34-41.
- [27] Ciudad G, Rubilar O, Muñoz P, *et al.* Partial nitrification of high ammonia concentration wastewater as a part of a shortcut biological nitrogen removal process [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(5): 1715-1719.
- [28] Laurenzi M, Falås P, Robin O, *et al.* Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures [J]. *Water Research*, 2016, **101**: 628-639.
- [29] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 610-616.
- Zhang G L, Li D, Zhang X J, *et al.* Stability for shortcut nitrification in SBR under low ammonia at low temperature[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 610-616.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoides</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)