

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,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,翁吴璐,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)
超富集植物藿香蓟(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)	

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¹, 荣懿¹, 刘晓鹏², 史会欣¹, 章武首³, 金鹏康^{1*}, 马文伟⁴

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西安市第五污水处理厂, 西安 710016; 3. 陕西朗正环保科技有限公司, 西安 710065; 4. 陕西环保集团水环境有限公司, 西安 710003)

摘要: 针对城镇污水中碳源不足、C/N 比低导致脱氮性能不佳的问题, 建立了 A²/O 中试装置, 通过调整系统缺氧/好氧分区比例及好氧区溶解氧水平, 探究亚硝氮积累率及氮类污染物去除情况。结果表明, 在 DO 为 2.0~2.5 mg·L⁻¹ 条件下, 改变缺氧/好氧分区比例对系统的影响较小, 难以实现短程硝化; 当控制 DO 为 0.5~0.8 mg·L⁻¹、 $V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}}=1:1$ 时为系统最优工况, 此时系统好氧区末端亚硝氮积累率稳定在 62% 以上, 出水总氮降至 9.0 mg·L⁻¹, 能够实现深度脱氮的目标。分析硝化菌表观活性可知, 最优工况下 SAOR 与 SNOR 分别(以 N/VSS 计)为 0.14 g·(g·d)⁻¹ 和 0.04 g·(g·d)⁻¹, 二者差值较试验其他阶段更为明显, 即 NOB 活性受到更高程度抑制是提高亚硝氮积累率的直接原因。Illumina MiSeq 测序结果表明, 该阶段 NOB 数量显著低于其他阶段。通过间歇 OUR 法分析缺氧区进出口碳源组成情况, 结果表明最优工况下系统通过短程硝化节约碳源 27.3%, 可生化性 COD 在缺氧区消耗 63.6%, 远高于其他阶段, 是低 C/N 比城市污水实现深度脱氮的碳源有力保障。

关键词: 分区供氧; 短程硝化反硝化; 低碳氮比; 深度脱氮; 城市污水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2310-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809038

Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control

WU Chun-lei¹, RONG Yi¹, LIU Xiao-peng², SHI Hui-xin¹, ZHANG Wu-shou³, JIN Peng-kang^{1*}, MA Wen-wei⁴

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Fifth Sewage Treatment Plant, Xi'an 710016, China; 3. Shaanxi Langzheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 4. Shaanxi Environmental Protection Group Water Environment Co., Ltd., Xi'an 710003, China)

Abstract: Poor nitrogen removal from municipal sewage is mainly due to insufficient carbon source and low C/N ratio. The A²/O pilot plant was established to investigate the accumulation rate of nitrous nitrogen and the removal of nitrogen pollutants by adjusting the ratio of anoxic/aerobic zoning and dissolved oxygen levels in the aerobic zone. The results showed that when DO is 2.0-2.5 mg·L⁻¹, changing the ratio of anoxic to aerobic zoning had little effect on the reaction system, and it was difficult to realize partial nitrification. When DO is 0.5-0.8 mg·L⁻¹, $V_{\text{Anoxic}}:V_{\text{Aerobic}}=1:1$, this is the best working condition of the system. The accumulation rate of nitrous nitrogen at the end of aerobic zone is stable at more than 62%, and the total nitrogen of effluent is reduced to 9.0 mg·L⁻¹, which can achieve the goal of deep denitrification. Analyzing the apparent activity of nitrifying bacteria, it was found that the SAOR and SNOR (according to N/VSS calculation) were 0.14 g·(g·d)⁻¹ and 0.04 g·(g·d)⁻¹, respectively, under the optimum conditions. The difference between them was more obvious than that in other stages of the experiment, that is, the higher inhibition of NOB activity was the direct reason for the increase of nitrite accumulation rate. Illumina MiSeq sequencing showed that the number of NOB in this stage was significantly lower than that in other stages. Intermittent OUR method was used to analyze the composition of carbon sources at the inlet and outlet of the anoxic zone. The results showed that short-cut nitrification and denitrification could save 27.3% of the carbon sources under the optimal operating conditions. The biodegradable COD consumption in the anoxic zone was 63.6%, which was much higher than that in other stages.

Key words: zoning oxygen; partial nitrification and denitrification; low C/N; advanced nitrogen removal; municipal sewage

日益严格的城镇污水排放标准对于污水的深度脱氮除磷提出更高要求^[1], 作为环境治理的主要承担者, 陕西省政府对渭河沿岸城镇污水厂氮磷污染物的深度去除极为重视。目前, 生物脱氮作为氮类污染物去除的主要方式^[2], 包括了硝化与反硝化两个阶段, 在实际过程中常常由于反硝化阶段碳源不足而成为限制深度脱氮的主要因素^[3-5]。基于亚硝化阶段直接转入反硝化而提出的短程硝化反硝化工艺能够在一定程度上缓解碳源不足的缺陷, 根据化

学计量学, 1 mol 的亚硝酸盐(NO₂⁻)与硝酸盐(NO₃⁻)被还原为 N₂ 所需的 BOD 分别为 1.71 mol 与 2.86 mol^[6], 因而该工艺理论上可节约 40% 的碳源^[7]; 此外, 由于硝化进程的缩短, 将有效节省曝

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016TZC-S-19-3); 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

作者简介: 吴春雷(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水的深度处理技术, E-mail: 1009750256@qq.com

* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

气量达 25%^[7]. 而成功实现短程硝化反硝化的关键在于富集氨氧化细菌(AOB)同时抑制亚硝氮氧化细菌(NOB)的活性^[8].

目前针对城市污水短程硝化反硝化处理的研究多采用实验室规模的序批式反应装置(SBR)^[9~11], 研究成果表明间歇曝气是 SBR 反应器实现短程硝化反硝化的有效途径之一^[12,13], 同时对间歇曝气的曝气强度^[14]及曝/停时间比^[15]进行了深入探究. 然而, 采用连续流反应器对实际城市污水开展的短程硝化中试研究却为数不多^[16], 且其中多数只关注好氧区低 DO 环境对 NOB 的淘洗作用^[17,18]. 当前我国采用连续流工艺的城镇污水处理厂约占总数的 90%, 其中 A/O 及 A²/O 工艺占到 50% 以上^[19]. 因此, 研究 A²/O 工艺的短程硝化启动与参数优化, 对城镇污水处理厂的提标改造及节能降耗具有重要的现实意义.

结合 SBR 反应器间歇曝气模式下对曝/停比的研究思路, 本文在探究 A²/O 反应器好氧区 DO 水平对硝化进程影响的基础上, 进一步考察不同缺氧/好氧区停留时间对亚硝酸盐的积累情况及系统的脱氮性能的影响; 另外, 由于推流式反应器在流速一定的条件下, 停留时间与容积成正比, 因此分区比例的差异可以直观地表现反应进程.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行程序

分区供氧改进型 A²/O 中试反应装置建设于西安市某污水处理厂研究基地, 采用不锈钢板焊接而成, 缺氧区与好氧区之间设置一系列挡板卡槽, 通过改变挡板位置保证所需的试验条件; 其平面示意图如图 1 所示, 反应器总容积为 7.8 m³, 其中沉淀池与浓缩池为 1.5 m³, 为减小污泥回流对二沉池底部的扰动影响, 采用气提方式先将污泥输送至浓缩池再经污泥回流泵回流至厌氧区入口与进水混合; 厌氧区容积为 0.9 m³, 其余部分为缺氧区与好氧区, 二者容积之比可满足 1:2、1:1、1.5:1 这 3 种分区比例下的调控, 混合液回流通过污水泵由好氧区出口至缺氧区入口. 进水及回流量采用电磁流量计控制, 曝气量通过高精度转子流量计调节.

反应装置运行情况如表 1 所示, 试验周期为 146 d, 分为 6 个阶段, 分别考察好氧区不同 DO 浓度及缺氧/好氧分区比例交互作用下短程硝化反硝化性能. 试验期间控制污泥浓度 (MLSS) 为 (3 500 ± 200) mg · L⁻¹, 温度为 (25 ± 1) °C, 污泥龄 (SRT) 为 12 d, 水力停留时间 10.5 h.

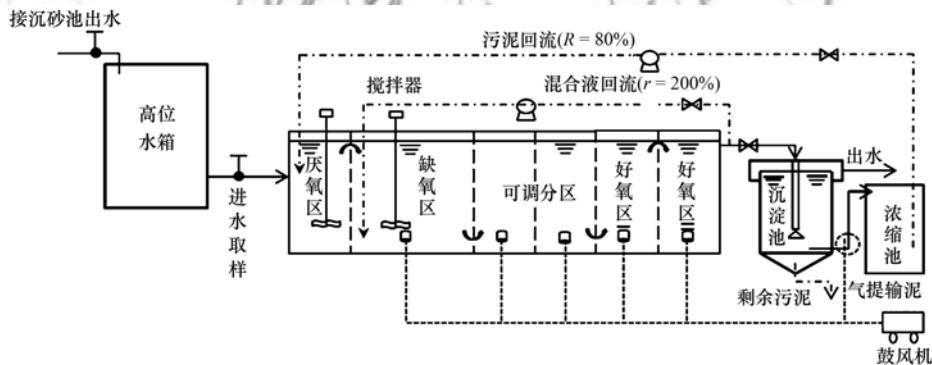


图 1 分区供氧改进型 A²/O 中试反应装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of modified A²/O pilot reactor for oxygen supply in partitions

表 1 分区供氧改进型 A²/O 反应器运行状况

Table 1 Operating conditions of modified A²/O reactor for oxygen supply in partitions

项目	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5	阶段 6
时间/d	1 ~ 26	27 ~ 48	49 ~ 74	75 ~ 90	91 ~ 127	128 ~ 146
V _缺 :V _好	1:2	1:1	1.5:1	1.5:1	1:1	1:2
好氧区 DO/mg · L ⁻¹	2.0 ~ 2.5	2.0 ~ 2.5	2.0 ~ 2.5	0.5 ~ 0.8	0.5 ~ 0.8	0.5 ~ 0.8

1.2 进水及接种污泥

采用西安市某污水处理厂曝气沉砂池出水经自 0.6 m³ · h⁻¹, 主要水质指标如表 2 所示.

制水箱进一步沉淀后作为反应装置进水, 进水量为

表 2 进水水质情况/mg · L⁻¹

Table 2 Influent water quality/mg · L⁻¹

项目	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TP
范围	181.8 ~ 384.6	41.5 ~ 63.2	26.4 ~ 45.7	0.3 ~ 2.4	0.04 ~ 0.18	3.6 ~ 8.4
均值	248.7	50.5	35.6	0.8	0.07	5.8

接种污泥选用西安市某污水处理厂(A²/O工艺,处理量20万m³·d⁻¹)好氧池末端混合液。

1.3 分析方法

进出水及混合液样品的NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻经0.45 μm滤膜过滤后,取滤液采用国标方法检测;进出水TN、TP、COD按照国标方法直接检测;混合液COD采用100 mL量筒静沉30 min后取上清液测定;DO、pH值及水温监测采用哈希公司WTW自动测定仪。

污水COD组分测定采用间歇OUR法:将待测混合液静沉后,取上清液1 L分析测定,具体方法如文献[20]所述。

微生物群落分析采用Illumina MiSeq测序技术;采用CTAB方法提取样本的基因组DNA,之后利用琼脂糖凝胶电泳检测DNA的纯度和浓度,取适量的样品于离心管中,使用无菌水稀释至1 ng·μL⁻¹。以稀释后的基因组DNA为模板,根据测序区域的选择,使用带Barcode的特异引物,New England Biolabs公司的Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix with GC Buffer和高效高保真酶进行PCR,确保扩增效率和准确性。

1.4 计算方法

1.4.1 NAR的计算

NAR指亚硝氮积累率,为好氧区末端NO₂⁻占NO₂⁻、NO₃⁻之和的比例:

$$NAR = \frac{NO_{2(好)}^-}{NO_{2(好)}^- + NO_{3(好)}^-} \times 100\% \quad (1)$$

式中,NO_{2(好)}⁻和NO_{3(好)}⁻分别表示好氧区末端NO₂⁻和NO₃⁻的浓度,mg·L⁻¹。

1.4.2 SAOR与SNOR的计算

分别采用比氨氮氧化速率和比亚硝酸盐氧化速率作为表征AOB和NOB活性的参数^[21]。

$$SAOR = \frac{NH_{4,s}^+ - NH_{4,e}^+}{(MLVSS \times t)} \times 1440 \quad (2)$$

$$SNOR = \frac{NO_{2,s}^- - NO_{2,e}^-}{(MLVSS \times t)} \times 1440 \quad (3)$$

式中,NH_{4,s}⁺和NO_{2,s}⁻分别表示批次硝化反应开始时刻NO₂⁻和NH₄⁺的浓度,mg·L⁻¹;NH_{4,e}⁺和NO_{2,e}⁻为批次反应结束时刻的浓度,mg·L⁻¹;MLVSS为挥发性污泥浓度,mg·L⁻¹;t是批次硝化时间,s。

2 结果与讨论

2.1 氮的形态转化与去除性能

试验过程依据缺氧/好氧分区比例及好氧区末端溶解氧DO分为6个阶段,旨在探究系统脱氮性能及短程硝化作用的最优工况。好氧区出水中NO_x⁻-N构成及亚硝氮积累率、反应器对氮类污染物去除情况分别如图2和图3所示。

第1阶段,控制DO为2.0~2.5 mg·L⁻¹,V_缺:V_好为1:2,此时好氧区末端NO₂⁻浓度在0.25 mg·L⁻¹波动,亚硝氮积累率不足3%;系统硝化类型属于全程硝化,NH₄⁺-N去除高于95%,反硝化效率限制了TN的进一步去除,出水中氮多以NO₃⁻形式存在,TN均值为13.3 mg·L⁻¹。第2阶段,调整V_缺:V_好为1:1,NAR与前一阶段基本持平,反应器对氮的去除性能未见明显变化。随着好氧区容积的进一步降低(V_缺:V_好为1.5:1),NO₂⁻开始呈现增加趋势,第3阶段末NO₂⁻浓度可稳定在1.0 mg·L⁻¹,

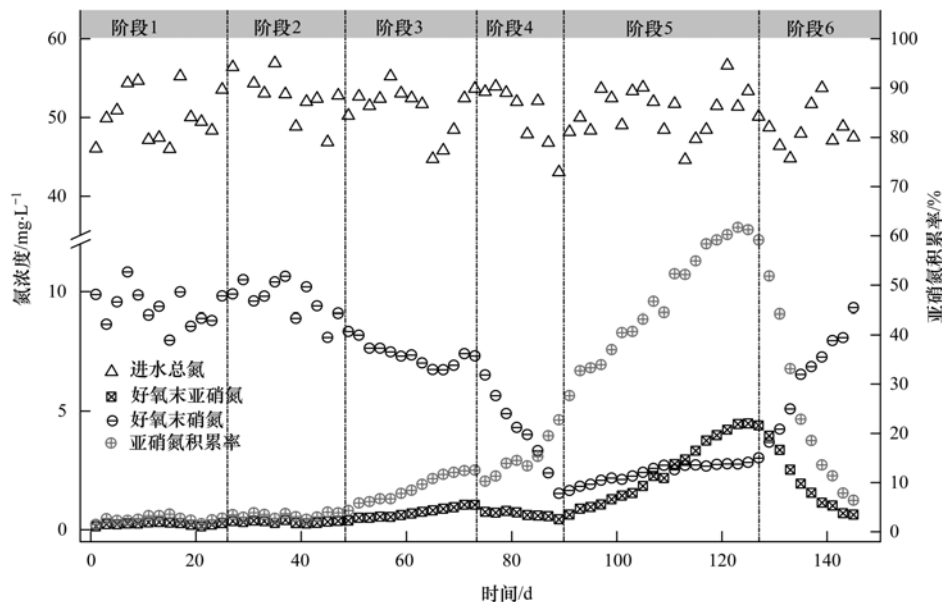


图2 好氧区末端亚硝氮积累情况

Fig. 2 Nitrite accumulation at the end of aerobic zone

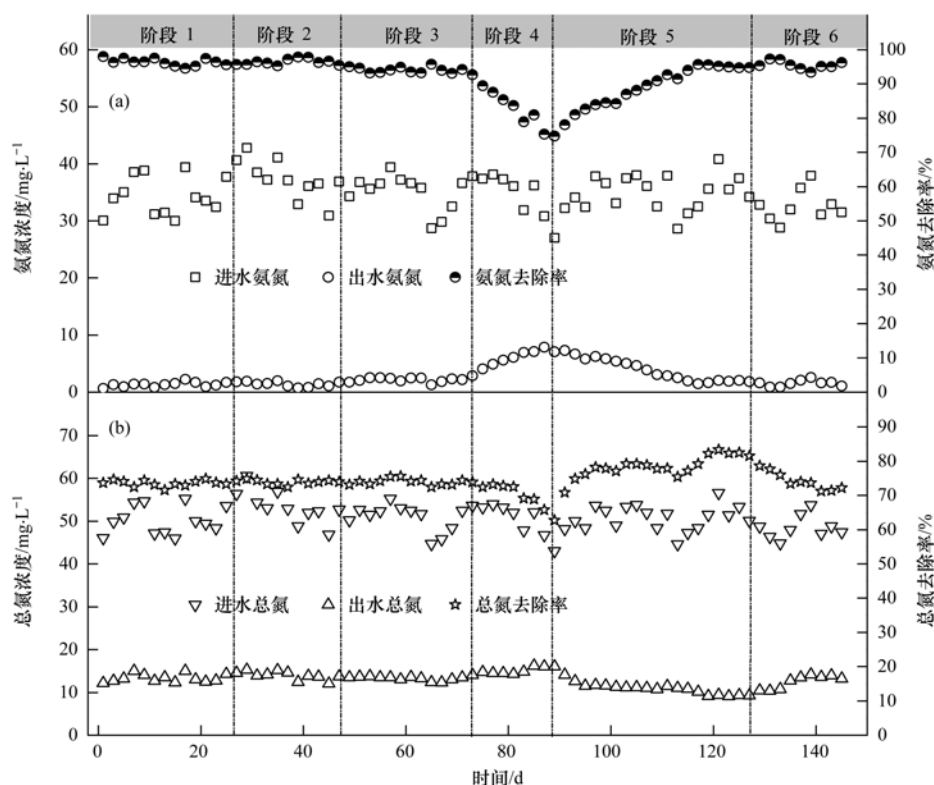


图3 氮类污染物去除情况

Fig. 3 Removal of nitrogen pollutants

而 NO_3^- 浓度较前两个阶段显著降低, 基本稳定在 $8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 此时 NAR 最高达到 12.9%; 然而该值仍远低于短程硝化反硝化的理论界定值 (50%), 仅表明曝气时间缩短对 NOB 具有一定抑制作用. 此外, 从脱氮效果来看, 虽然 NH_4^+-N 去除相对于阶段 1、2 略有降低, 但系统对 TN 降解并未受到影响, TN 平均去除率为 73.7%. 因此, 就试验前三阶段整体而言, 当反应器以高 DO 运行时, 调整缺氧/好氧分区比例对系统硝化类型没有明显改变.

第 4 ~ 6 阶段控制好氧区 DO 为 $0.5 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中第 4 阶段 $V_{\text{缺}}:V_{\text{好}}$ 为 1.5:1, 结果表明好氧区末端 NO_3^- 大幅度降低, 由 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $2.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并发生 NO_2^- 相对积累, 但 NAR 仍低于 25%; 从氮的去除情况分析, NH_4^+-N 去除率降至 70% 以下, 出水 NH_4^+-N 最高达到 $7.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TN 相应增加, 氮的降解性能较差. 说明在低 DO 与短时间曝气的双重作用下, 硝化细菌活性受到严重抑制, 且这种抑制作用有加剧趋势, 为保证系统微生物活性, 及时终止该阶段. 第 5 阶段将 $V_{\text{缺}}:V_{\text{好}}$ 调整为 1:1, 随着系统运行, 好氧区末端 NAR 逐步上升, 最终稳定在 62.6%, 该值与付国楷等^[22] 倒置型 A^2/O 中试的短程硝化效果 ($\text{NAR} \approx 65\%$) 较为接近; 由于微生物逐渐适应环境变化, 本阶段末

NH_4^+-N 去除率升至 95%; 出水 TN 降至 $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率可达 83.9%, 较高 DO 全程硝化工况下提高 9.2%, 实现深度脱氮的目标. 第 6 阶段, $V_{\text{缺}}:V_{\text{好}}$ 增加至 1:2, 曝气时间延长, 短程硝化系统崩溃, NAR 在试验末期降为 5.9%; 由脱氮性能分析, 该阶段工况变化对 NH_4^+-N 影响较小, NH_4^+-N 去除率依然保持在 95.6%, 而 TN 去除率降至 72.3%, 出水 TN 超过 $13.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 本阶段结果表明, 随着活性污泥与分子氧接触的几率增加, NOB 在低氧状态下受到的抑制作用得以减弱甚至解除. 综合阶段 4 ~ 6, 说明在低 DO 环境下, 缺氧区与好氧区容积的合理设置对于短程硝化的高效诱导至关重要.

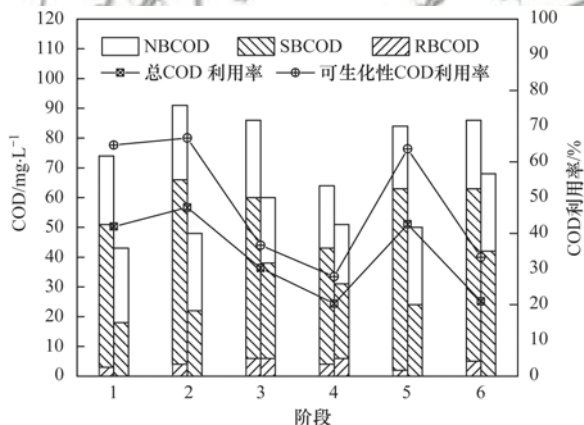
2.2 碳源利用情况分析

系列活性污泥模型 (ASMs) 对废水 COD 组分进行了划分. 有研究表明快速易生物降解 COD (RBCOD) 和慢速可生物降解 COD (SBCOD) 直接与微生物增殖、氧利用动态特性以及营养物的去除有关^[23]. 根据 ASM-1 模型, 异养反硝化菌的作用更依赖于易生物降解底物^[24]; 而 SBCOD 作为城市污水 COD 的主要组分多以大分子物质存在, 无法被异养菌直接利用, 需水解为小分子物质方可参与生化反应, 而充足的缺氧区 HRT 是水解作用的必要条件.

每一阶段从第 10 d 起, 间隔 2 d, 分别取缺氧

区首、末端混合液测定碳源组分,并以本阶段最后3次数据的平均值进行分析.各阶段 COD 组分构成及利用情况如图4所示.

由图4对缺氧区碳源变化分析可知,第1、2阶段碳源消耗量基本相同,这是因为二者缺氧/好氧容积比虽然不同,但曝气强度较大,硝化程度较高,此时回流液中 NO_3^- 浓度高,因此反硝化过程反应推动力较大直至 SBCOD 在缺氧区末端消耗殆尽仍有较大一部分 NO_3^- 存在.第3阶段,缺氧区末端 RBCOD 与 SBCOD 开始有所提升,原因在于缺氧/好氧容积比进一步增大,这时硝化程度较前两个阶段明显降低,且回流液中存在少部分 NO_2^- ,反硝化过程对于碳源的需求量降低;此外,随着缺氧区 HRT 增加水解反应加剧,缺氧区末端发生 RBCOD 积累.第4阶段,保持第3阶段相同的缺氧/好氧容积比而降低 DO ($0.5 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),RBCOD 与 SBCOD 均呈现进一步上升趋势,验证了上述结论的合理性;另外,大量积累的可生化性 COD 进入好氧区将会造成异养菌与自养硝化菌的竞争,且后者比增殖速率远小于前者,因此 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除性能显著下降.第5阶段,随着好氧区 HRT 延长,硝化作用逐渐恢复,此时反硝化对碳源的需求量与缺氧区碳源的水解反应基本达到平衡,所以碳源利用效率较高.第6阶段,缺氧区容积减小,水解作用成为限制反硝化的主要因素,碳源利用率下降,导致 COD 积累.



每阶段的两条柱分别为:缺氧区首端、缺氧区末端

图4 不同点位水样 COD 含量及其组分变化

Fig. 4 Variation of COD content and composition in water samples at various locations

另外,分析低 DO 状态下 COD 的消耗情况,阶段5污水中 COD 在缺氧段降低 42.5%,与生化作用直接相关的可生化性 COD 降低 63.6%,而第4、6阶段可生化性 COD 分别降低为 27.9%、33.3%.相对于低氧环境的其他阶段,第5阶段回流硝化液中电子受体(主要为 NO_2^-)的量与缺氧段碳源水解处于动态平衡,是利用碳源合理分配保证反硝化深

度脱氮的必要条件.

相对于全程硝化而言,短程硝化的优点在于尽可能地降低反硝化的碳源需求,因此对各工况缺氧段去除单位质量 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ ($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 之和)所消耗 COD 的量进行分析,其结果如图5所示.高 DO 状态下,系统反硝化去除单位质量的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 消耗 COD 的量明显高于低 DO 状态下对 COD 的消耗量,其中差异最为显著的第1、5阶段(以 COD/N 计)分别为 $4.4 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ 、 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$,表明在短程硝化效果最优工况下节约碳源量 27.3%,该值较理论值有所降低,这是因为回流硝化液中仍有一部分 NO_3^- 存在,同时其他生化过程也对 COD 的消耗具有一定贡献.

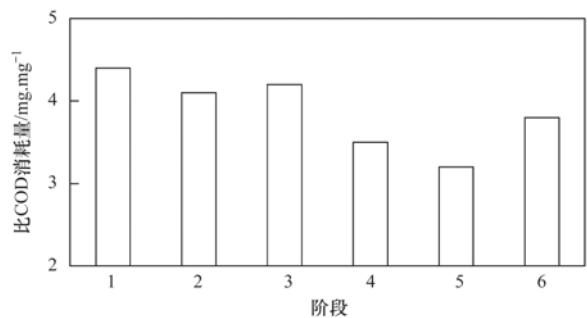


图5 各阶段去除单位质量 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 消耗 COD 情况

Fig. 5 COD consumption per unit mass $\text{NO}_x^- - \text{N}$ at each stage

2.3 微生物环境分析

结合图2发现,在高 DO 状态下,调节缺氧/好氧容积比无法实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 有效积累,而低 DO 条件下 NAR 相对较高,表明相对于缺氧/好氧分区比例,DO 对短程硝化的实现起到决定性作用.根据以往研究结论,AOB、NOB 的 DO 饱和常数分别为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.7 \sim 1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [25],即在低 DO 条件下 AOB 生长速率大于 NOB.因此,当系统 DO 维持在 $2.0 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,好氧区曝气时间减少对于 AOB 与 NOB 竞争体系造成不利影响也可由高 DO 进行修复,系统的硝化速率较高,在较短的好氧区 HRT 下也能实现全程硝化.

而在低 DO 条件下,NAR 随缺氧/好氧容积比的调节变化明显,且第5阶段成功实现短程硝化,此时主要的运行参数:好氧区 DO 为 $0.5 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,缺氧、好氧 HRT 均为 4.5 h.首先,低 DO 环境自身会对 NOB 的增长繁殖形成的一定的抑制;其次,缺氧好氧交替的运行模式有利于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累,其对 NOB 的抑制程度与缺氧持续时间成正比 [26].在阶段5条件下,缺氧/好氧间歇时间比能够满足保留 AOB 而淘洗 NOB 的环境条件,从而实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 高效积累.而阶段4由于缺氧时间过长,AOB 受到的抑制作用同样不可忽视;同时如 2.2 节

分析, 过多的有机碳源进入好氧区发生异养菌竞争加剧, 从而降低 NH_4^+ -N 氧化效率. 阶段 6, 曝气时间延长, 在好氧区生成的 NO_2^- 无法在缺氧区及时通过反硝化去除, NO_2^- -N 在好氧区内进一步被少量 NOB 缓慢氧化成 NO_3^- -N, 充足的底物供应使 NOB 的饥饿状态得到缓解并逐渐恢复活性; 同时长时间的低氧状态也会对 NOB 具有驯化作用, 在一定程度上削弱低 DO 对其抑制作用.

为了定量分析亚硝氮高效积累的关键因素, 采用 SAOR 与 SNOR 作为表征 AOB、NOB 表观活性的参数, 取每一阶段最后 3 d 的数据进行分析. 各阶段 SAOR 及 SNOR 变化情况如图 6 所示.

由图 6 可见, 高 DO 状态下的 SAOR 及 SNOR 整体高于低 DO 状态下的 SAOR 及 SNOR; 且高 DO 条件下, 随着缺氧/好氧容积比的增大, 两者变化幅度基本一致, 因此 NO_2^- -N 难以积累. 而低 DO 条件下, SAOR 与 SNOR 的变化幅度出现较大差异, 随着好氧区 HRT 增加, 由阶段 4 至阶段 5, SAOR 与 SNOR 分别增长 75.0%、14.3%, 而阶段 5 至阶段 6, 二者相应增长 33.0%、150.0%. 由此可见, 当缺氧/好氧容积比超过 1:1 时, 继续增加曝气时间对 AOB 活性的促进作用远小于 NOB, 此时 NOB 活性快速升高, 系统在阶段 5 形成的短程硝化体系遭到破坏.

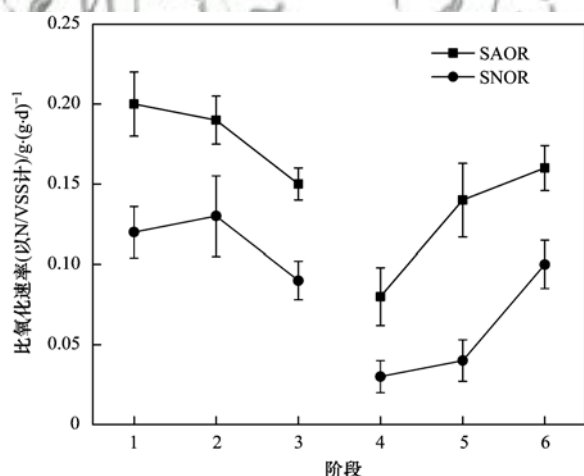


图 6 各阶段 SAOR 与 SNOR 变化情况

Fig. 6 Changes of SAOR and SNOR in different stages

为进一步探究短程硝化的实现机制, 对 1、5、6 阶段末的微生物群落进行检测, 通过 Illumina MiSeq 测序分析, 以说明 NO_2^- -N 积累的微生物学原因. 图 7 为不同试验阶段硝化细菌在属水平上的分类结果. 测序结果显示 AOB 主要包括亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 与亚硝化螺旋菌属 (*Nitrosospira*), 而 NOB 以硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*) 与硝化球菌属 (*Nitrococcus*) 为主. AOB 在微生物群落中分布占比

由第 1 阶段 0.96% 至第 5 阶段变为 0.89%, 而 NOB 的相应变化由 3.73% 降至 1.57%, 二者的变化率分别为 7.3% 和 57.9%, 表明分区比例及 DO 浓度的调整对 NOB 的淘洗作用更为显著, 这与 AOB 和 NOB 表观活性分析结论相一致. 阶段 6, 随着曝气时间延长, AOB 和 NOB 占比分别为 0.9% 和 3.39%, 该阶段 NOB 数量迅速增加而 AOB 基本稳定, 因此短程硝化体系遭到破坏. 综合各阶段硝化细菌群落分布, 说明 NOB 相对于 AOB 而言对于生境变化更为敏感^[27].

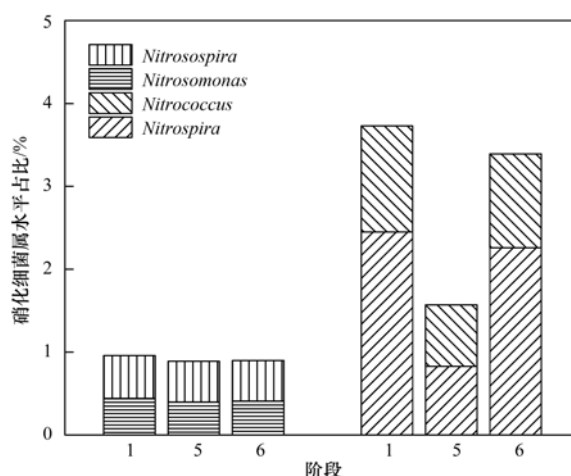


图 7 典型阶段硝化细菌属水平分布占比

Fig. 7 Proportion of nitrobacterium on genus level on typical stage

3 结论

(1) 相对于缺氧/好氧分区比例而言, DO 对短程硝化的实现起到决定性作用; 高 DO 条件下, 改变分区比例均无法实现短程硝化, 而在低 DO 条件下, 调整分区比例对运行效果影响显著. 当 DO 为 $0.5 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $V_{\text{缺}}:V_{\text{好}}$ 为 1:1 时, NAR 最高可达 62.6%, 出水 TN 降至 $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可实现深度脱氮的目标.

(2) 在最优工况下, 通过短程硝化去除单位质量 NO_x^- -N 消耗 COD 的量与消耗量最高的阶段 1 相比降低 27.3%, 另外可生化性 COD 在缺氧区利用率为 63.6%, 远高于其他阶段. 表明有机碳源在缺氧区的消耗量与回流硝化液中电子受体含量及碳源水解反应程度相关.

(3) 在高 DO 条件下, AOB 与 NOB 的活性与低 DO 条件下相比整体较高; 在低 DO 条件下, AOB 与 NOB 活性随着好氧区曝气时间延长而增加, 但二者对曝气时间增加的敏感度存在差异; 微生物群落分析发现, 与典型的全程硝化阶段相比, 短程硝化效率最高工况下 AOB、NOB 分别降低 7.3%、57.9%, 表明分区比例及 DO 浓度的调整对 NOB 的淘洗作用更为显著.

参考文献:

- [1] Zhou H X, Li X, Xu G R, *et al.* Overview of strategies for enhanced treatment of municipal/domestic wastewater at low temperature[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 225-237.
- [2] Liu H B, Chen Z H, Guan Y N, *et al.* Role and application of iron in water treatment for nitrogen removal: A review [J]. *Chemosphere*, 2018, **204**: 51-62.
- [3] Pelaz L, Gómez A, Letona A, *et al.* Nitrogen removal in domestic wastewater. Effect of nitrate recycling and COD/N ratio [J]. *Chemosphere*, 2018, **212**: 8-14.
- [4] Chen Y Z, Li B K, Ye L, *et al.* The combined effects of cod/n ratio and nitrate recycling ratio on nitrogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic/aerobic (A^2/O)-biological aerated filter (BAF) systems [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, **93**: 235-242.
- [5] 桑浪涛, 石烜, 张彤, 等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1965-1971.
- Sang L T, Shi X, Zhang T, *et al.* Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1965-1971.
- [6] Jenni S, Vlaeminck S E, Morgenroth E, *et al.* Successful application of nitrification/anammox to wastewater with elevated organic carbon to ammonia ratios [J]. *Water Research*, 2014, **49**: 316-326.
- [7] Tobino T, Chen J X, Sawai O, *et al.* Inline thickener-MBR as a compact, energy efficient organic carbon removal and sludge production device for municipal wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2016, **107**: 177-184.
- [8] Ma B, Bao P, Wei Y, *et al.* Suppressing nitrite-oxidizing bacteria growth to achieve nitrogen removal from domestic wastewater via anammox using intermittent aeration with low dissolved oxygen [J]. *Science Report*, 2015, **5**: 13048.
- [9] Huang X W, Urata K, Wei Q Y, *et al.* Fast start-up of partial nitrification as pre-treatment for anammox in membrane bioreactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 371-378.
- [10] 吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 等. 连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1472-1477.
- Wu P, Zhang S Y, Song Y L, *et al.* Quick start-up and sustaining of shortcut nitrification in continuous flow reactor[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1472-1477.
- [11] 马琳娜, 刘文龙, 张琼, 等. 游离亚硝酸(FNA)对 A^2O 污泥菌群结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(7): 2566-2573.
- Ma L N, Liu W L, Zhang Q, *et al.* Effect of free nitrous acid (FNA) on microorganism community structures of A^2O sludge [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2566-2573.
- [12] Miao Y Y, Peng Y Z, Zhang L, *et al.* Partial nitrification-anammox (PNA) treating sewage with intermittent aeration mode: Effect of influent C/N ratios [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **334**: 664-672.
- [13] 董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 等. 间歇曝气SBR与传统SBR处理养猪沼液的比较研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4309-4316.
- Dong B G, Song X Y, Liu R, *et al.* A comparative study on performance of an intermittent aeration SBR and a traditional SBR for treatment of digested piggery wastewater [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4309-4316.
- [14] 刘宏, 南彦斌, 李慧, 等. 间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 865-871.
- Liu H, Nan Y B, Li H, *et al.* Effect of aeration rate on shortcut nitrification recovery in intermittent aeration mode [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 865-871.
- [15] 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 等. 间歇曝气比在短程硝化中对硝化活性的影响[J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(12): 1317-1321.
- Liu H, Peng Y Z, Lu J Y, *et al.* Effect of the ratio of intermittent aeration on activity of nitrifying bacteria in shortcut nitrification [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, **39**(12): 1317-1321.
- [16] Zhang T, Wang B, Li X Y, *et al.* Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **335**: 330-337.
- [17] 朱强, 刘凯, 董石语, 等. 连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4316-4323.
- Zhu Q, Liu K, Dong S Y, *et al.* Start-up and capacity enhancement of a partial nitrification pilot reactor in continuous flow [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4316-4323.
- [18] 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 等. ABR-MBR工艺处理生活污水实现短程硝化[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5154-5161.
- Lü L, Zhao S H, Wei J M, *et al.* Realization of shortcut nitrification in the ABR-MBR process treating domestic wastewater [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5154-5161.
- [19] Zhang Q H, Yang W N, Ngo H H, *et al.* Current status of urban wastewater treatment plants in China [J]. *Environment International*, 2016, **92-93**: 11-22.
- [20] 曹海彬, 张代钧, 卢培利. 活性污泥模型进水COD组分的测定方法[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2005, **28**(9): 83-87.
- Cao H B, Zhang D J, Lu P L. Measurements of influent COD components for activated sludge models [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, **28**(9): 83-87.
- [21] Wang Z C, Gao M C, Wei J F, *et al.* Long-term effects of salinity on extracellular polymeric substances, microbial activity and microbial community from biofilm and suspended sludge in an anoxic-aerobic sequencing batch biofilm reactor [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, **68**: 275-280.
- [22] 付国楷, 周琪, 杨殿海, 等. 倒置 A^2/O 工艺的短程生物脱氮中试[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(17): 38-41.
- [23] 金鹏康, 常晋, 王先宝, 等. 不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3443-3448.
- Jin P K, Chang J, Wang X B, *et al.* Variation of different carbon sources in the sewage treatment process [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3443-3448.
- [24] Xie W M, Ni B J, Sheng G P, *et al.* Quantification and kinetic characterization of soluble microbial products from municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2016, **88**: 703-710.
- [25] 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.
- [26] Gao F, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Study of an innovative anaerobic (A)/oxic (O)/anaerobic (A) bioreactor based on denitrification-anammox technology treating low C/N municipal sewage [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **232**: 65-73.
- [27] 季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 等. 高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 260-268.
- Ji M, Liu L J, Zhai H Y, *et al.* Mechanism for effects of high free ammonia loadings on biological nitrification [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 260-268.

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)