

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.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

Type 0092 丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现

高春娣¹, 安冉¹, 韩徽¹, 张娜¹, 任浩¹, 赵楠¹, 焦二龙^{1,2}, 彭永臻¹

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 2. 北京排水集团, 北京 100037)

摘要: 利用 Type 0092 丝状菌不易引发污泥恶性膨胀的特点, 本实验采用实际生活污水, 以 SBR 反应器接种短程硝化污泥, 考察了短程硝化状态下启动 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀的特性, 研究了系统启动与维持期间的污泥沉降性能、亚硝酸盐积累率(NAR)、污染物去除特性以及污泥菌群结构变化情况。结果表明控制 DO 为 0.3~0.8 mg·L⁻¹, F/M(以 COD/MLSS 计) = 0.24 kg·(kg·d)⁻¹, 按照交替缺氧/好氧模式运行(单周期 3 次, 缺氧: 好氧 = 20 min: 60 min), 能够启动 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀与短程硝化耦合, 系统 SVI 值维持在 180 mL·g⁻¹ 左右, NAR 一直维持在 99% 左右, COD 和 TN 去除率能够分别提高约 13% 和 5%, 相较于传统全程硝化非微膨胀状态曝气量能节省约 62.5%。当交替缺氧/好氧模式变为单周期交替 6 次, 缺氧: 好氧 = 10 min: 30 min, 亚硝酸盐氧化菌(NOB)的活性会恢复, 使短程硝化被破坏; 低溶解氧、交替缺氧/好氧、低负荷是实现 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀的关键因素, 当负荷(以 COD/MLSS 计)大于 0.25 kg·(kg·d)⁻¹ 时, 仅靠低溶解氧和间歇曝气无法维持污泥微膨胀状态。

关键词: 节能; 低溶解氧; 缺氧/好氧交替; Type 0092 丝状菌; 污泥微膨胀; 短程硝化

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)08-3722-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201901014

Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification

GAO Chun-di¹, AN Ran¹, HAN Hui¹, ZHANG Na¹, REN Hao¹, ZHAO Nan¹, JIAO Er-long^{1,2}, PENG Yong-zhen¹

(1. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group CO., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Type 0092 filamentous bacteria generally do not result in excessive sludge bulking. To take advantage of this, domestic sewage was used to inoculate shortcut nitrification sludge in a sequencing batch reactor (SBR). Sludge settleability, the nitrite accumulation ratio (NAR), pollutant removal characteristics, and the dynamic variation of microbial communities during the system startup and maintenance were investigated. The results indicated that limited filamentous bulking (LFB) with Type 0092 filamentous bacteria combined with shortcut nitrification could be achieved under alternating anoxic and aerobic (four times/cycle; the ratio of anoxic/aerobic was 20 min/60 min) with low dissolved oxygen (DO) content (0.3~0.8 mg·L⁻¹) and a low food/microorganism (F/M) ratio [0.24 kg·(kg·d)⁻¹, COD/MLSS]. The removal rate of COD and total nitrogen (TN) were increased by 13% and 5% when the sludge volume index (SVI) and NAR were maintained at approximately 180 mL·g⁻¹ and 99%, respectively, and aeration consumption was reduced by 62.5% compared to general whole-run nitrification. When the ratio of anoxic/aerobic changed to be 10 min/30 min as alternating times increased to 6 times per cycle, the activity of the nitrite oxidizing bacteria (NOB) recovered, causing shortcut nitrification to be destroyed. In addition, low DO, alternate anoxic/aerobic modes, and low loading rates were the key factors in achieving LFB with Type 0092 filamentous bacteria as the dominant filamentous bacteria. Limited filamentous bulking could not be maintained under low DO and alternating anoxic/aerobic conditions with loading rates above 0.25 kg·(kg·d)⁻¹, COD/MLSS.

Key words: energy saving; low dissolved oxygen; alternate anoxic/aerobic mode; Type 0092 filamentous bacteria; limited filamentous bulking; shortcut nitrification

活性污泥法是目前世界上应用最广泛的污水处理工艺^[1], 而污泥膨胀一直是活性污泥法污水处理厂运行管理的常见问题^[2,3]。由于实际工程中出现了由低溶解氧引发的丝状菌污泥膨胀在控制得当的时候, 不但不引发污泥流失, 还提高了出水水质, 同时大大节省了曝气能耗的情况, 彭永臻^[4,5]等提出了“低溶解氧污泥微膨胀节能理论”。另外许多研究表明, 低溶解氧条件有利于实现短程硝化^[6], 其相比全程硝化如可节约 25% 的曝气能耗。

目前关于低溶解氧污泥微膨胀耦合短程硝化的研究已经有了一定成果, 如: Guo 等^[7]在 A/O 反应器实现了微膨胀和短程硝化的耦合, 并验证组合工艺可以实现更高的 TN 的去除率, 彭赵旭等^[8]通过

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478012); 北京市科技重大专项(Z181100005318001)

作者简介: 高春娣(1973~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为城镇污水深度处理与资源化利用、丝状菌污泥膨胀机制与控制, E-mail: gaochundi@bjut.edu.cn

人工配水在 SBR 反应器中也验证了短程硝化和污泥微膨胀耦合的可行性,但利用丝状菌生理学特性在短程硝化工艺中引发特定丝状菌污泥微膨胀的方法鲜有报道.现有的关于丝状菌生理学特性的报道指出,Type 0092 丝状菌是一类常出现在活性污泥处理系统中的绿弯菌门丝状菌,它一般隐藏在污泥菌胶团絮状体内部,不易引起污泥恶性膨胀^[9~11].有研究表明间歇曝气也有利于短程硝化的实现^[12],而 Type 0092 丝状菌也适宜在间歇曝气的城市污水曝气池中^[13],由此可见,Type 0092 丝状菌污泥微膨胀和短程硝化工艺的耦合可能更易于启动和维持,因此本研究采用 SBR 反应器,接种短程硝化污泥,探究在低溶解氧缺氧多次交替情况下 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀在短程硝化工艺中的启动情况,并考察耦合工艺的稳定性.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方式

本实验采用 SBR 反应器.实验装置如图 1 所示,SBR 反应器有效体积为 8 L,为有机玻璃圆柱形装置,分别设有进水、排水、排泥口;反应器内安装搅拌器使混合液混匀,采用鼓风曝气方式以曝气盘为反应器供氧,通过配备的气体流量计控制系

统的溶解氧浓度;采用加热棒维持恒定的系统温度;采用 SBR 法污水处理智能控制装置对系统的运行进行自动控制,通过不同的时间程序设定达到不同的运行效果.



图1 SBR 实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagrams of the laboratory experimental setup of the SBR reactor

本实验 SBR 反应器排水定比为 50%,每周期进水量为 4 L,反应器运行分为 2 个阶段,共 120 d,每天均运行 4 个周期共 480 周期,具体运行参数见表 1 所示.

表 1 实验运行方案
Table 1 Operational stages and experimental procedures

项目	周期	运行方式	温度 /℃	DO /mg·L ⁻¹	污泥浓度 /mg·L ⁻¹	污泥 COD 负荷 (以 COD/MLSS 计) /kg·(kg·d) ⁻¹
阶段一	1~300	交替运行 3 次,缺氧:好氧=20 min:60 min	26±1	0.3~0.8	2 500~4 000	0.238±0.037
阶段二	301~480	交替运行 6 次,缺氧:好氧=10 min:30 min	26±1	0.3~0.8	2 500~4 000	0.296±0.031

1.2 实验水质和污泥来源

本实验反应器接种活性污泥取自短程硝化中试排泥,该污泥沉降性能和活性均较好,未发生污泥膨胀.

本实验采用北京某高校家属区化粪池的生活污水为实验用水,该实际生活污水属于典型的低碳氮比污水,且水质随季节变化,实验过程中不进行碱度调节,水质情况如表 2 所示.

表 2 进水水质
Table 2 Characteristics of the wastewater

项目	pH	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹
范围	6.9~7.8	60.2~373.2	26.1~91.8	0~3.6	0~2.1	27.6~93.6	2.3~7.2

1.3 常规分析项目及方法

SV、SVI、MLSS、MLVSS、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 参照文献[14]测得. COD 采用连华科技 5B-3COD 快速测定仪器测定. DO、pH 和温度等采用 WTW pH/Oxi 3420 型测定仪测定.

1.4 常规微生物学及 FISH 影像定性分析

采用 Olympus BX61 荧光显微镜进行常规镜检及 FISH 影像分析,确定优势丝状菌. 本实验所用

FISH 探针见表 3.

1.5 实时荧光定量聚合酶链式反应(qPCR)

分子生物学实验所用 DNA 为采用 FastDNA[®] SPIN Kit for Soil (QBIogen Inc, Carlsba, CA, 美国) DNA 提取试剂盒提取的反应器活性污泥样品总 DNA.

qPCR 反应体系按照 SYBR Premix EX Taq 染料法实时荧光定量试剂盒说明书配制,qPCR 实验所用引物见表 4.

表 3 FISH 分析中所用到的寡核苷酸探针
Table 3 Oligonucleotide probes used in FISH analysis

目标细菌	探针名称	序列(5'-3')	标记位点	荧光类型	FA 含量	文献
Type 0092 (variant 1)	CFX197	TCCCGGAGCGCCTGAACT	197-215	CY3	40%	[15]
Type 0092 (variant 2)	CFX223	GGTGCTGGCTCCTCCCAG	223-241	CY3	35%	[15]
全菌	EUB338	GCT GCC TCC CGT AGG AGT	338-355	FITC	a ¹⁾	[16]
	全菌 EUB338-Ⅱ	GCA GCC ACC CGT AGG TGT	338-355	FITC	a	[17]
	EUB338-Ⅲ	GCT GCC ACC CGT AGG TGT	338-355	FITC	a	[17]

1) 表示 EUB 探针结合其他目标菌探针一起使用, 其 FA 浓度使用目标菌探针的 FA 浓度

表 4 qPCR 引物的寡核苷酸序列及反应条件²⁾
Table 4 Oligonucleotide sequences of the primers

目标细菌	引物名称	序列(5'-3')	反应条件	文献
全菌 16S	341f	CCTACGGGAGGCAGCAG	95℃ 3 min	[18]
	534r	TTACCGCGGCTGCTGGCAC	40cycles:95℃ 10s; 55℃ 30s; 72℃ 45S	
AOB	amoA-1f	GGGGTTTCTACTGCTGGT	95℃ 3 min	[19]
	amoA-2r	CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC	35cycles:94℃ 30 s; 55℃ 30 s; 72℃ 60 s	
<i>Nitrobacter</i> spp.	FGPS872f	CTAAAACTCAAAGGAATTGA	95℃ 10 min	[20]
	FGPS1269r	TTTTTTGAGATTGCTAG	40cycles:95℃ 10 s; 51℃ 30 s; 72℃ 45 s	
<i>Nitrospira</i> spp.	NSR1113f	CCTGCTTTCAGTTGCTACCG	95℃ 10 min	[21]
	NSR1264r	GTITGCAGCGCTTTGTACCG	40cycles:95℃ 310 s; 53℃ 30 s; ③ 72℃ 30 s	
<i>Nitrotoga</i> spp.	NTG200F	CTCGCGTTTTCGGAGCGG	95℃ 2 min	[22]
	NTG840R	CTAAGGAAGTCTCCTCCC	30cycles:95℃ 10 s; 55℃ 30 s; 72℃ 45 s	
Type 0092	ET2F	AGTTCAGGCGCTCCGGGA	94℃ 4 min	本研究
	ET2R	GGYTACCTTGTTCACACTT	30cycles:94℃ 30 s; 50℃ 30 s; ③ 72℃ 60 s	

2 结果与讨论

2.1 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀的形成与破坏

图 2 表示的是 SBR 反应器污泥容积指数(SVI)及污泥浓度 (MLSS) 的变化曲线. 从中可知, 在反应器运行到第 141 周期即第 35 d, 系统 SVI 值升高到 180.68 mL·g⁻¹. 对污泥进行镜检, 如图 3(a) 和 3(b) 可见, 污泥菌胶团呈分散状, 大量无分支短直形菌丝伸出菌胶团, 系统发生丝状菌污泥膨胀. 根据污泥膨胀动力学选择理论, 丝状菌相比于菌胶团细菌具有更低的溶解氧和底物饱和常数. 本系统溶解氧为 0.3~0.8 mg·L⁻¹, 阶段一的平均进水负荷

(以 COD/MLSS 计, 下同) 为 (0.238 ± 0.004) kg·(kg·d)⁻¹, 在低溶解氧低负荷状态下丝状菌处于竞争优势地位, 为丝状菌过量增殖创造了条件. 对污泥进行 FISH 影像定性分析, 如图 3(c) 和 3(d) 可见, 引发污泥膨胀的优势丝状菌为 Type 0092 丝状菌.

Type 0092 丝状菌无分支, 不能运动, 菌丝呈直的或轻微的弯曲状, 为革兰氏阴性和纳氏阳性菌. 据报道, Type 0092 丝状菌能够在缺、好氧状态分别以 NO₂⁻ 和 O₂ 为电子受体吸收和降解有机物, 适宜生长在间歇曝气的低 F/M 城市污水曝气池中, 在菌群发育关系上属于绿弯菌门^[9, 13]. Type 0092 丝状菌是常出现在活性污泥处理系统中的一类丝状菌, 一般隐藏在污泥菌胶团絮状体内部, 不易引起污泥恶性膨胀^[9]. 本实验反应器按缺氧好氧交替的模式在低溶解氧低负荷的状态下运行, 满足 Type 0092 丝状菌的生长需求, 使它得以优势生长, 因此在本阶段系统的 SVI 能够稳定维持在 180 mL·g⁻¹ 左右, 即达到污泥微膨胀状态.

进入阶段二, 反应器的交替次数增加, 运行至第 10 d, 系统 SVI 值开始下降, 随后一直呈下降趋势, 最终达到 84.09 mL·g⁻¹. 通常缺氧好氧交替次数增加会削弱缺、好氧选择器的效果^[23], 另一方面由一氧化氮理论可知交替次数增加更利于 Type 0092 丝状菌的增殖, 而本实验 SVI 值却出现下降, 这一

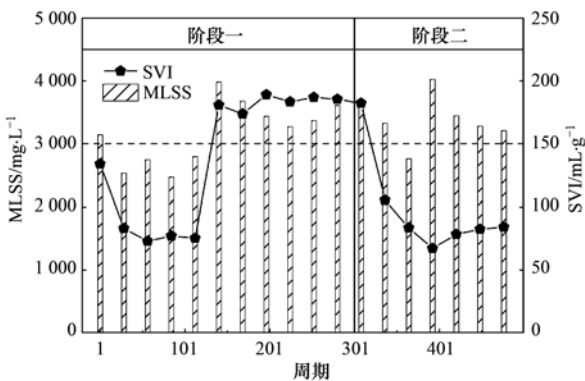
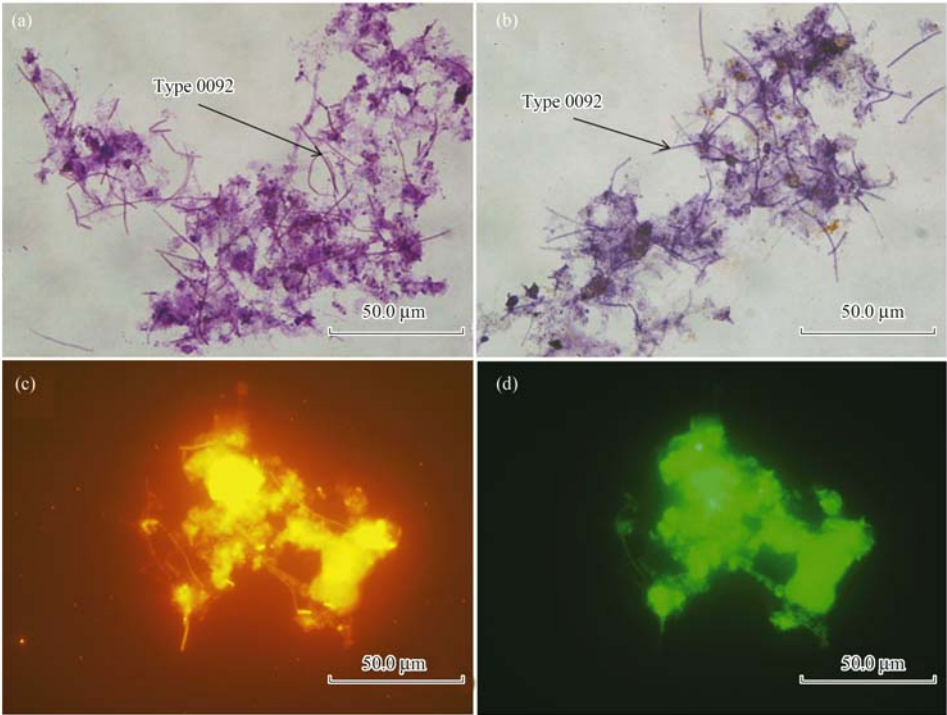


图 2 全阶段系统 SVI 值和污泥浓度 (MLSS) 变化
Fig. 2 Variations in SVI values and MLSS during the continuous operational period



(a) 革兰氏染色; (b) 纳氏染色; (c) Type 0092 (cy3 标记的 CFX197); (d) 全菌 (FITC 标记的 EUBmix)

图3 革兰氏、纳氏染色和带有荧光标记寡核苷酸探针的特异性丝状菌 FISH 影像

Fig. 3 Gram stained, Nessler stained, and typical FISH images of filamentous bacteria with fluorescently labeled rRNA-targeted oligonucleotide probes

阶段活性污泥中 Type 0092 丝状菌丰度下降. 考察这一阶段对污泥膨胀有影响的几个因素发现, 本实验中污泥微膨胀的破坏与污泥负荷的改变有关. 文献[24]中曾有报道, 在 SBR 反应器中的活性污泥, 当负荷大于 $0.25\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 靠单独降低溶解氧是无法维持污泥微膨胀状态的. 随着这一阶段进入冬季, 生活污水 COD 升高, 系统进水污泥负荷由 $(0.238 \pm 0.004)\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 升高到 $(0.296 \pm 0.031)\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 有机负荷的升高已足以使菌胶团细菌处于竞争优势地位, Type 0092 丝状菌生长受到抑制, 污泥微膨胀状态被破坏.

2.2 短程硝化的维持与破坏

在阶段一(1~300 周期), 系统按缺、好氧比为 20 min:60 min 交替 3 次的模式运行. 如图 4 所示, 第 133 周期即系统运行的第 34 d, 出水亚硝酸盐浓度开始下降, 由一开始 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右下降至 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 值得注意的是, 虽然出水亚硝酸盐的浓度出现了下降, 但在此阶段系统的 NAR 一直维持在 99% 左右, 未出现明显下降趋势, 这说明出水几乎不含硝酸盐氮, NOB 的活性依然是被抑制的, 短程硝化并没有被破坏.

在阶段二(301~480 周期), 系统按缺、好氧比为 10 min:30 min 交替 6 次的模式运行. 如图 4 所示, 本阶段系统出水亚硝酸盐浓度及 NAR 整体都呈下降趋势, 系统运行末期 NAR 降至 30% 左右,

短程硝化被破坏. 这反映出此活性污泥系统氧化亚硝酸盐的活性已经得到一定程度的恢复. 这主要是由于交替次数的增多导致每段缺氧时间减少, 减弱了缺氧交替对 NOB 活性的抑制作用, 使 NOB 活性得以恢复, 这一结果也表明增加交替次数并不一定有助于稳定维持短程硝化.

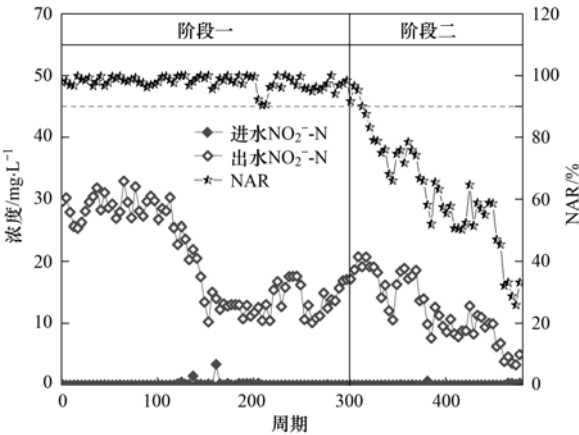


图4 亚硝积累率及亚硝酸盐浓度变化

Fig. 4 Variations in NO_2^- -N concentrations and NAR

2.3 优势丝状菌和硝化细菌菌群结构的变化

为了研究系统中优势丝状菌和硝化细菌菌群结构的变化, 取初始阶段(短程硝化阶段)、反应器运行至第 240 周期(短程硝化耦合微膨胀阶段)、反应器运行至第 480 周期(短程硝化、微膨胀破坏阶段)

的活性污泥样品依次编号为 1、2 和 3，提取 DNA，然后采用 qPCR 技术分析本系统各阶段的微生物菌群结构。

由图 5 可以看出，即使所取种泥来自于长期稳定的短程硝化系统，但是 NOB 的主要菌属 *Nitrobacter* spp.、*Nitrospira* spp. 和 *Nitrotoga* spp. 仍然存活于该污泥系统中，只是没有表现出来氧化亚硝酸盐的活性。发生污泥微膨胀后，优势丝状菌 Type 0092 的丰度（以 gene/VSS 计，下同）由 $(4.83 \pm 0.53) \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 变为 $(6.96 \pm 0.28) \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ，升高到原来的 144%，而由于丝状菌优势生长，以及缺氧交替的抑制，AOB 和 NOB 的丰度分别由 $(3.39 \pm 0.19) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(1.58 \pm 0.14) \times 10^{11} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $(2.19 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $(9.74 \pm 0.85) \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ，系统氨氧化能力下降，但 AOB 占硝化细菌的含量却基本保持不变，甚至从 0.21% 升高到 0.23%，短程硝化没有受到破坏。

在实验末期，系统 SVI 值、NAR 下降，污泥微膨胀、短程硝化被破坏，优势丝状菌 Type 0092 在活性污泥中的丰度又下降到 $(4.89 \pm 0.34) \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ，AOB 的丰度下降到 $(8.19 \pm 0.91) \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ，NOB 的丰度升高到 $(2.03 \pm 0.09) \times 10^{11} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在这一阶段，系统增加了交替次数，削弱了对 NOB 的抑制，使其氧化亚硝酸盐的活性恢复并表达出来。另外，根据文献[25]报道长期低 DO 运行，AOB 对溶解氧的亲和能力会下降，使 NOB 的生长速率能够远大于 AOB，使短程硝化被破坏，在本研究中或存在这一原因使 AOB 占硝化细菌的比例下降至 0.04%。同时加强了反硝化，使兼有以亚硝酸盐为基质进行硝化和反硝化功能的 *Nitrobacter* spp. 得以优势生长，丰度从 $(5.40 \pm 0.22) \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高到 $(1.23 \pm 0.08) \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ，使系统短程硝化被破坏但总氮去除效果变好。除此之外，有报道称在低 DO 条件下^[26]，*Nitrospira* spp. 中存在一种菌可以将氨氮直接氧化成为硝酸盐氮，本实验短程硝化破坏前后的 *Nitrospira* spp. 丰度由 $(9.20 \pm 0.85) \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高到 $(1.90 \pm 0.09) \times 10^{11} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ，这亦可能是短程破坏的一个原因。

2.4 污染物去除效果的分析

图 6 为系统全阶段污染物去除效果变化图。在 1~140 周期，系统未发生污泥膨胀，处于短程硝化状态，系统各污染物去除率呈小幅波动但处理效果稳定， $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 COD 的平均去除率分别为 88.90%、45.03%、和 60.99%。

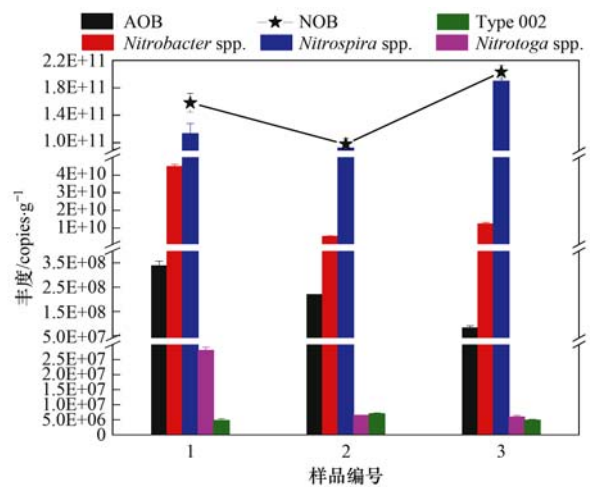


图 5 硝化细菌、优势丝状菌丰度变化

Fig. 5 Variations in the abundance of AOB, NOB and dominant filamentous bacteria

在第 141~300 周期，系统进入 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀耦合短程硝化状态，随着 SVI 值的升高，系统的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率降低、TN 及 COD 去除率升高，三者的平均去除率分别变为 68.74%、49.38% 和 73.46%。相比于单一的短程硝化，污泥微膨胀状态下 Type 0092 丝状菌适量生长，增加了系统的网捕作用，COD 去除率提高了将近 13%。同时微膨胀状态下絮体体积适当变大，阻碍了外部溶解氧向絮体内部的扩散，导致絮体外部溶解氧浓度较高，硝化细菌优势生长，絮体内部溶解氧浓度较低造成缺氧环境，反硝化细菌优势生长，形成了利于同步硝化反硝化作用的微环境，使 TN 的去除率提高了将近 5%。发生微膨胀后出水氨氮浓度升高，基本维持在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右，分析原因这一方面是因为硝化反应时间较短，不足以将进水氨氮反应完全，另一方面是因为系统发生丝状菌污泥膨胀，菌胶团细菌占据劣势，系统氨氧化能力减弱。

在第 301~480 周期，也就是阶段二，系统污泥微膨胀和短程硝化状态先后破坏，系统 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 COD 的平均去除率分别达到 88.46%、63.02%、和 84.74%。由于季节的原因这一阶段进水 COD 升高，菌胶团细菌相比于丝状菌更占优势，系统污泥微膨胀状态被破坏，系统的氨氧化能力得到了恢复，同时这一阶段系统缺氧交替次数增加为 6 次，系统能够更好地进行反硝化作用，碳源更好地被利用，因此 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 COD 的去除率均得到升高。

2.5 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀耦合短程硝化典型周期污染物变化情况

Type 0092 丝状菌污泥微膨胀耦合短程硝化实

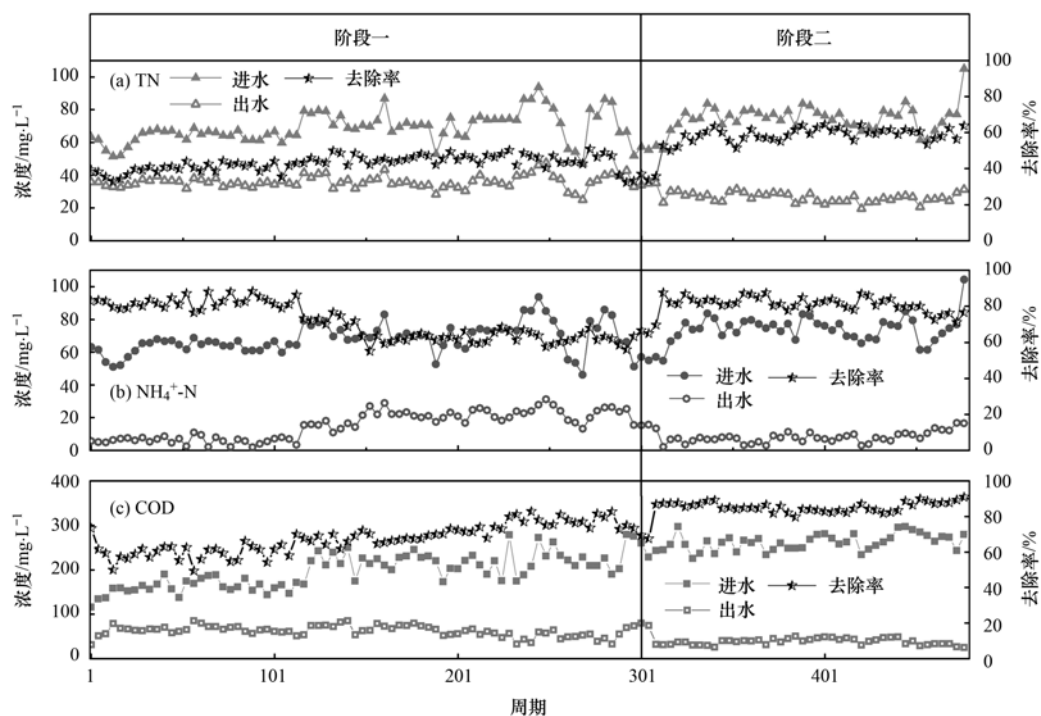


图 6 全阶段各污染物去除率变化

Fig. 6 Variations in pollutant removal rates during the continuous operational period

现后,某典型周期内污染物浓度及 DO、pH 值变化规律见图 7。从中可知, pH 值在缺氧反硝化过程中逐渐升高,在好氧硝化过程中逐渐下降,整个反应过程中呈下降趋势。好氧硝化过程,系统内溶解氧先急速升高,接着稳定在一定水平,而后随着氨氧化菌(AOB)活性的恢复开始下降。且随着硝化反应的进行,系统内的氨氮浓度逐渐降低,亚硝酸盐浓度逐渐升高,同时氨氧化反应速率降低,好氧速率减慢,第三段好氧段末期 DO 有上升趋势。COD 在第一个好氧段基本降解完成,整个周期内硝酸盐浓度几乎为 0 mg·L⁻¹。自反应开始, TN 几乎一直在下降,好氧段的总氮损失甚至高于缺氧段的,这说明在低溶解氧状态下,系统进行氨氧化反应的同时

有相当一部分的亚硝酸盐氮被具有反硝化的细菌利用进行了反硝化作用。

2.6 低溶解氧污泥微膨胀耦合短程硝化节能降耗分析

从以下两方面对系统发生 Type 0092 丝状菌污泥微膨胀耦合短程硝化反硝化期间的节能情况进行分析。

2.6.1 节约曝气量

曝气量的节约主要因为短程硝化和低溶解氧。在硝化过程中,理论上每氧化 1 g 氨氮至亚硝酸盐氮需要 3.43 g 氧气,每氧化 1 g 氨氮至硝酸盐氮需要 4.57 g 氧气。本实验低溶解氧污泥微膨胀耦合短程硝化阶段,溶解氧控制在 0.3 ~ 0.8 mg·L⁻¹ 范围

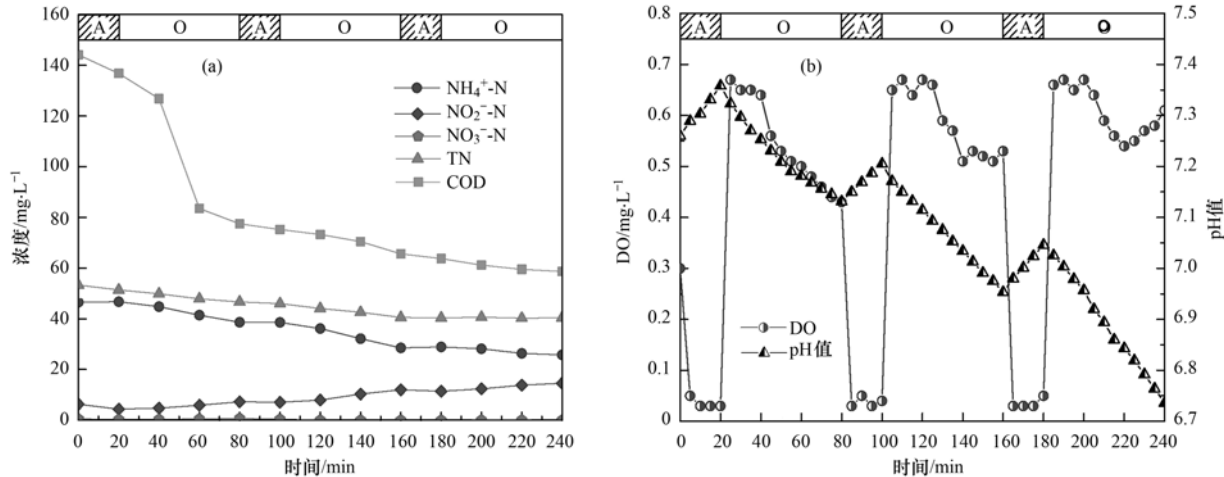


图 7 系统典型周期污染物浓度及 DO、pH 值变化

Fig. 7 Variation in pollutant concentrations, DO, and pH during a typical cycle

内,参与反应的氨氮几乎全部转化为亚硝酸盐氮,无硝酸盐氮产生,单纯就短程硝化而言能节约25%的曝气量.同时,相关文献[27]中对污水处理厂维持不同溶解氧所需曝气量的计算表明,维持溶解氧为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 所需理论曝气量相对于维持溶解氧为 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可节约17%.本实验室采用常规溶解氧的全程硝化工艺系统好氧段总曝气量约每个周期144 L,本实验中Type 0092 丝状菌污泥微膨胀耦合短程硝化工艺稳定运行期间系统好氧段总曝气量约每个周期54 L,相比而言约节省62.5%的曝气量.

2.6.2 节约碳源

反硝化过程的实质是以硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体进行氧化还原.有研究显示^[28],考虑反硝化细菌利用碳源进行细胞合成的因素在内,以甲醇作为电子供体进行反硝化时,每还原1 g 硝酸盐氮为氮气需要甲醇2.47 g,每还原1 g 亚硝酸盐氮为氮气需要甲醇1.53 g.本实验采用低溶解氧缺氧交替的方式运行,一方面使短程硝化反硝化稳定维持,理论上可节省38%的碳源,另一方面强化了同步硝化反硝化,有利于反硝化细菌利用原水中的碳源进行反硝化,使碳源利用率提高.

3 结论

(1)在SBR反应器中接种短程硝化污泥,控制DO为 $0.3\sim 0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $F/M=0.24\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,按照缺氧好氧比为20 min:60 min的方式运行,能够成功富集Type 0092 丝状菌,启动污泥微膨胀与短程硝化工艺的耦合.

(2)Type 0092 丝状菌污泥微膨胀耦合短程硝化工艺会加强同步硝化反硝化,使系统出水亚硝酸盐浓度下降至 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,但NAR稳定维持在99%左右,相对于单独的短程硝化可以将系统的TN和COD去除率分别提高约5%和13%,相对于常规溶解氧全程硝化工艺可节约曝气量约62.5%.

(3)增加交替比,缩短缺氧段的时间至10 min,会减弱缺氧交替对NOB活性的抑制作用,使短程硝化被破坏.

(4)低溶解氧、间歇曝气、低负荷是Type 0092 丝状菌污泥微膨胀启动的关键因素,当负荷大于 $0.25\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 时,仅靠低溶解氧和间歇曝气无法维持污泥微膨胀状态.

参考文献:

- [1] Wang P, Yu Z S, Zhao J H, *et al.* Seasonal changes in bacterial communities cause foaming in a wastewater treatment plant[J]. *Microbial Ecology*, 2016, **71**(3): 660-671.
- [2] Zhang C Y, Zhang H M, Yang F L. Granulation of non-filamentous bulking sludge directed by pH, ORP and DO in an anaerobic/aerobic/anoxic SBR[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2016, **178**(1): 184-196.
- [3] 陈燕,刘国华,范强,等.不同溶解氧条件下A/O系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2610-2616.
- [4] Chen Y, Liu G H, Fan Q, *et al.* Carbon/nitrogen removal and bacterial community structure change in an A/O activated sludge system under different dissolved oxygen conditions[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2610-2616.
- [5] 彭永臻,郭建华,王淑莹,等.低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3342-3347.
- [6] Peng Y Z, Guo J H, Wang S Y, *et al.* Energy saving achieved by limited filamentous bulking under low dissolved oxygen: derivation, originality and theoretical basis[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3342-3347.
- [7] Guo J H, Peng Y Z, Peng C Y, *et al.* Energy saving achieved by limited filamentous bulking sludge under low dissolved oxygen[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(4): 1120-1126.
- [8] Jiang Y S, Poh L S, Lim C P, *et al.* Impact of free nitrous acid shock and dissolved oxygen limitation on nitrification maintenance and nitrous oxide emission in a membrane bioreactor[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 11-17.
- [9] Guo J H, Peng Y Z, Yang X, *et al.* Combination process of limited filamentous bulking and nitrogen removal via nitrite for enhancing nitrogen removal and reducing aeration requirements[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(1): 68-75.
- [10] 彭赵旭,彭永臻,左金龙,等.污泥微膨胀状态下短程硝化的实现[J]. *环境科学*, 2009, **30**(8): 2309-2314.
- [11] Peng Z X, Peng Y Z, Zuo J L, *et al.* Realization of short cut nitrification under the limited filamentous sludge bulking condition[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(8): 2309-2314.
- [12] Kragelund C, Levantesi C, Borger A, *et al.* Identity, abundance and ecophysiology of filamentous bacteria belonging to the *Bacteroidetes* present in activated sludge plants[J]. *Microbiology*, 2008, **154**(3): 886-894.
- [13] Nielsen P H, Kragelund C, Seviour R J, *et al.* Identity and ecophysiology of filamentous bacteria in activated sludge[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2009, **33**(6): 969-998.
- [14] Noutsopoulos C, Mamais D, Andreadakis A. A hypothesis on *Microthrix parvicella* proliferation in biological nutrient removal activated sludge systems with selector tanks[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **80**(2): 380-389.
- [15] 王永磊,刘宝震,张克峰.厌氧氨氧化脱氮工艺研究进展[J]. *山东建筑大学学报*, 2016, **31**(3): 259-269.
- [16] Wang Y L, Liu B Z, Zhang K F. Research progress of biological nitrogen removal from sewage via anammox[J]. *Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering*, 2016, **31**(3): 259-269.
- [17] Welz P J, Esterhuysen A, Vulindlu M, *et al.* Filament identification and dominance of Eikelboom type 0092 in activated sludge from wastewater treatment facilities in Cape Town, South Africa[J]. *Water SA*, 2014, **40**(4): 649-658.
- [18] 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.
- [19] Speirs L, Nittami T, McIlroy S, *et al.* Filamentous bacterium Eikelboom type 0092 in activated sludge plants in Australia is a member of the phylum *Chloroflexi*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(8): 2446-2452.

- [16] Amann R I, Binder B J, Olson R J, *et al.* Combination of 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes with flow cytometry for analyzing mixed microbial populations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, **56**(6): 1919-1925.
- [17] Daims H, Brühl A, Amann R, *et al.* The domain-specific probe EUB338 is insufficient for the detection of all *Bacteria*: development and evaluation of a more comprehensive probe set [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**(3): 434-444.
- [18] Koike S, Krapac I G, Oliver H D, *et al.* Monitoring and source tracking of tetracycline resistance genes in lagoons and groundwater adjacent to swine production facilities over a 3-year period[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(15): 4813-4823.
- [19] Wang S Y, Wang Y, Feng X J, *et al.* Quantitative analyses of ammonia-oxidizing Archaea and bacteria in the sediments of four nitrogen-rich wetlands in China [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(2): 779-787.
- [20] Ahn J H, Yu R, Chandran K. Distinctive microbial ecology and biokinetics of autotrophic ammonia and nitrite oxidation in a partial nitrification bioreactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **100**(6): 1078-1087.
- [21] Wang F, Liu Y, Wang J H, *et al.* Influence of growth manner on nitrifying bacterial communities and nitrification kinetics in three lab-scale bioreactors [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2012, **39**(4): 595-604.
- [22] Alawi M, Lipski A, Sanders T, *et al.* Cultivation of a novel cold-adapted nitrite oxidizing betaproteobacterium from the Siberian Arctic [J]. *The ISME Journal*, 2007, **1**(3): 256-264.
- [23] 田文德, 李伟光, 张卉, 等. 两级生物选择同步除磷脱氮新工艺[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(2): 221-225.
- Tian W D, Li W G, Zhang H, *et al.* Bi-bio-selective simultaneous phosphorus and nitrogen removal (BBSPN) novel process [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(2): 221-225.
- [24] 彭赵旭. 污泥微膨胀低能耗方法的基础研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 22-40.
- [25] 吴军, 张悦, 徐婷, 等. AOB 溶解氧亲和力低于 NOB 条件下序批反应器中 NOB 淘汰的实现机制 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(12): 3583-3590.
- Wu J, Zhang Y, Xu T, *et al.* Mechanisms of partial nitrification in sequencing batch reactor under the condition of AOB oxygen affinity lower than NOB [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3583-3590.
- [26] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [J]. *Nature*, 2015, **528**(7583): 504-509.
- [27] 郭建华, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能方法在 A/O 中的试验验证 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3348-3352.
- Guo J H, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Energy saving achieved by limited filamentous bulking under low dissolved oxygen: experimental validation in A/O process [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3348-3352.
- [28] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)