

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性

高春娣¹, 孙大阳¹, 安冉¹, 赵楠¹, 焦二龙², 祝海兵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: 污泥微膨胀耦合短程硝化是一种利用低溶解氧(DO)引发丝状菌有限繁殖和亚硝酸盐(NO_2^- -N)积累来协同提高氮的去除率并降低能耗的新工艺。为分析该工艺启动的可行性和长期稳定性, 采用两个间歇式反应器(SBR)并通过调整曝气方式, 考察低DO($0.3 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下污泥沉降性、亚硝酸盐累积率(NAR)、总氮的去除特性、优势丝状菌和硝化菌群的动态变化。结果表明, 缺氧: 好氧 = 15 min: 30 min的间歇曝气运行方式下, 可以实现NAR约为50%和稳定的污泥微膨胀, 污泥体积指数(SVI)稳定在 $170 \sim 200 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。实时连续曝气可以实现NAR为95%以上, 并且 NO_2^- -N的累积引发了以Type 0092型为优势丝状菌的污泥微膨胀, 但无法长期维持。改变运行方式为间歇曝气, 运行60 d左右可以实现短程硝化和微膨胀耦合及长期稳定维持, TN的去除率稳定在66%。FISH分析间歇曝气引发污泥微膨胀主要丝状菌是*M. parvicella*和Type 0092型。Q-PCR对硝化菌群定量分析得出SBR A初期和末期AOB占全菌的比例分别由0.53%提高到2.19%, NOB由17.5%降至3.2%。SBR B里AOB由0.51%提高到1.53%, 而NOB由18.05%降至11.01%。

关键词: 低溶解氧; 污泥微膨胀; 亚硝酸盐累积率; 污泥体积指数; 总氮去除率; 间歇曝气

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3271-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711250

Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration

GAO Chun-di¹, SUN Da-yang¹, AN Ran¹, ZHAO Nan¹, JIAO Er-long², ZHU Hai-bing¹

(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: Limited filamentous bulking (LFB) combined with nitrification under low dissolved oxygen (DO) is a new technology for enhancing nitrogen removal and reducing aeration requirements. In order to investigate the feasibility and sustainability of this technology, two sequence batch reactors (SBRs) were operated under different regimes to stimulate different aeration modes under low DO ($0.3 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). Sludge settleability, nitrite accumulation ratio (NAR), total nitrogen (TN) removal rate, dynamic variation of dominant filaments, and nitrifying bacterial communities were investigated. The results indicated that short-cut nitrification combined with LFB could be achieved under intermittent aeration, and the ratio of anoxic/aerobic was 15 min/30 min, the value of sludge volume index (SVI) was maintained from $170 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ to $200 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. An NAR above 95% was achieved under real-time continuous aeration. Meanwhile, LFB was induced when nitrite started to accumulate, and the dominant filament was Type 0092. However, the limited bulking was not maintained for the long term. After a transfer from continuous aeration to intermittent aeration, LFB reappeared in 60 days and the value of SVI remained between $170 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ and $200 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. The process of nitrification combined with LFB was maintained stably for the next two months, and the TN removal rate was above 66%. FISH analysis indicated that the identical dominant filaments were *M. parvicella* and Type 0092 for maintaining limited bulking in the two reactors. qPCR results showed that proportion of AOB in the total bacteria increased from the previous 0.53% to 2.19% in the end, whereas that of NOB decreased from 17.5% to 3.2% in SBR A. Moreover, the proportion of AOB increased from 0.51% to 1.53%, whereas that of NOB decreased from 18.05% to 11.01% in SBR B.

Key words: low dissolved oxygen; limited filamentous bulking; nitrite accumulation ratio; sludge volume index; TN removal rate; intermittent aeration

污泥丝状菌膨胀一直以来是困扰城市污水生物处理工艺的主要问题之一, 由于丝状菌的过量增殖所引起的活性污泥絮体结构的破坏, 从而导致生物系统脱氮去除有机物能力的下降; 另外污泥沉降性变差会引起污泥流失甚至整个生物系统的崩溃。迄今为止, 国内外关于污泥膨胀的研究多集中于污泥

膨胀的机制、预防及控制方面^[1]。而关于利用丝状

收稿日期: 2017-11-28; 修订日期: 2017-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478012); 北京市教委科研项目(KM201410005009)

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

菌污泥膨胀的理论和方法鲜见报道,低氧环境下污泥微膨胀技术可以利用丝状菌特性提高污染物去除效率并降低曝气降耗^[2,3],其旨在维持丝状菌和菌胶团的生长达到动态平衡. Guo 等^[4]运行 A/O 反应器研究了不同梯度的 DO 和 F/M 对微膨胀启动的影响,并成功启动了微膨胀.

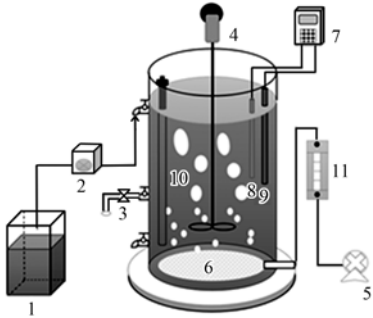
同时,低氧有利于富集氨氧化细菌以促进 NO_2^- -N 的累积^[5], Guo 等^[6]在 A/O 反应器进一步实现了微膨胀和短程硝化的耦合,并验证组合工艺实现了更高的 TN 的去除率,彭赵旭等^[7]通过人工配水在 SBR 工艺中也验证了短程硝化和污泥微膨胀耦合的可行性,但是在处理实际生活污水能否长期维持尚未研究. 另外,间歇曝气可以抑制 NOB 的活性有利于促进 NO_2^- -N 的累积,但其对污泥沉降性和絮体结构的影响也尚未报道. 本研究采用两个 SBR 反应器常温下处理实际生活污水,分别研究连续曝气和间歇曝气运行方式对污泥沉降性和亚硝酸盐累积的影响,并考察低氧间歇曝气下污泥微膨胀耦合短程硝化的可行性和长期稳定性.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置为序批式 SBR 反应器,圆柱形有机玻璃制成,有效容积为 9 L,进排水 5 L,反应器下面装

有曝气盘并连接转子流量计和空气压缩机,可调控产溶解氧量,上部固定电动搅拌器,使泥水充分混匀,装有加热棒维持反应温度,排水口连接电动阀用于自动排水. WTW3420 溶氧仪装有 DO, pH 探头监测反应过程 DO 和 pH 的变化. 实验装置见图 1.



1. 贮水箱; 2. 蠕动泵; 3. 电动水阀; 4. 搅拌器; 5. 空气泵; 6. 曝气盘; 7. WTW 溶氧仪; 8. pH 探头; 9. DO 探头; 10. 加热棒; 11. 空气转子流量计

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of laboratory-scale experimental SBR reactor setup

1.2 实验水质和污泥

本实验接种污泥来自北京市高碑店污水处理厂二沉池回流污泥,该污泥脱氮除磷性能良好,沉降性正常. 进水水质为校家属区实际生活污水,平均 C/N < 3.0 为低碳氮比生活污水,水质详细数据如表 1 所示.

表 1 生活污水水质参数

Table 1 Characteristics of the raw wastewater

参数	COD /mg·L ⁻¹	NH_4^+ -N /mg·L ⁻¹	NO_2^- -N /mg·L ⁻¹	NO_3^- -N /mg·L ⁻¹	PO_4^{3-} -P /mg·L ⁻¹	pH	C/N
范围	111.5 ~ 275.5	44.2 ~ 84.5	0.01 ~ 1.05	0.02 ~ 1.05	3.4 ~ 7.2	7.2 ~ 7.8	2.25 ~ 3.55
平均	185.5	70.3	0.1	0.1	5.8	7.56	2.9

1.3 实验运行方案

SBRA 和 SBRB 的运行分为两个阶段,阶段一均采用实时控制^[8]方法,进水后曝气 3 ~ 4 h,氨谷点前停止曝气,然后静置排水,每天运行两个周期. 阶段 2 均采用间歇曝气的方式运行,总反应时间为 4.5 h,自动运行,每天运行 3 个周期. 具体的运行参数见表 2 所示.

1.4 分析指标和方法

实验分析指标包括 COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、

NO_3^- -N、TN、MLSS、SVI. 其中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 使用 Lachat QuikChem8000 流动注射自动测定仪 (Lachat Instruments, Milwaukee, USA). COD、MLSS、SVI 根据标准方法测得^[9]. 菌种普通镜检通过革兰氏和纳氏染色法,所用仪器为 OLYMPUS-BX61 显微镜,并通过 Image-Pro Plus 软件分析细菌的大小和形态. 特异性优势丝状菌菌种鉴定采用 FISH 分析法,使用 FISH 探针信息如表 3 所示. 硝化细菌的数量通过实时定量 PCR (qPCR) 分析,所

表 2 实验运行和方案

Table 2 Operation stages and experimental procedure

编号	周期/d	运行方式	HRT/h	DO/mg·L ⁻¹	SRT/d	温度/℃
SBR A	阶段一(0 ~ 275)	实时控制	5.5 ~ 7.0	0.3 ~ 0.8	20 ~ 22	21 ~ 27
	阶段二(276 ~ 400)	缺氧: 好氧 = 15 min: 30 min	8			
SBR B	阶段一(0 ~ 100)	实时控制	5.5 ~ 7.0	0.3 ~ 0.8	20 ~ 22	21 ~ 27
	阶段二(101 ~ 400)	缺氧: 好氧 = 15 min: 30 min	8			

表 3 FISH 分析寡核苷酸探针
Table 3 Oligonucleotide probes used in the FISH analysis

目标细菌	探针名称	序列(5'-3')	甲酰胺/%	文献
全菌 (EUBmix)	EUB338	GCT GCC TCC CGT AGG AGT	0 ~ 60	[10]
	EUB338-II	GCA GCC ACC ACG AGG TGT	0 ~ 60	[10]
	EUB338-III	GCT GCC ACC CGT AGG TGT	0 ~ 60	[10]
<i>Microthrix parvicella</i>	MPA-T1-1260	TTC GCA TGA CCT CAC GGT TT	25	[11]
Type 0092	CFX197	TCC CGG AGC GCC TGA ACT	40	[12]
	CFX223	GGT GCT GGC TCC TCC CAG	35	[12]

用仪器为 Stratagene Mx3000P Real-Time PCR System (Agilent Technologies, USA). 所用引物的名称和序列如表 4 所示.

2 结果与讨论

2.1 低溶解氧实时连续曝气下短程硝化耦合微膨胀的实现与破坏

SBR A 在阶段一(0 ~ 275 d)控制反应器的 DO 浓度为 0.3 ~ 0.8 mg·L⁻¹. 如图 2 所示在第 80 d,出水有明显的亚硝酸盐累积现象,并在第 180 d 和 220

d,系统出水NO₂⁻-N的积累率分别达到 85% 和 95% 以上,由于氨氧化细菌(AOB)相比于亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)有更低氧饱和常数^[17],所以低溶解氧环境一定程度地抑制 NO_B 的代谢,促进亚硝酸盐的累积. 另外根据 DO-pH 曲线实时控制在氨谷点前停止曝气,有效抑制了 NO_B 的生长,加快了短程硝化的实现.

根据污泥膨胀动力学选择理论,丝状菌相比较菌胶团细菌具有更低的溶解氧和底物的饱和常数. 因此低氧状态下长期运行可能会诱导丝状菌增殖导

表 4 PCR 引物的寡核苷酸序列

目标细菌	引物名称	序列(5'-3')	程序	文献
全菌	341f/534r	CCTACGGGAGGAGCAGCAG /TTACCGCGCTGCTGGCAC	95℃反应 3 min, 95℃反应 10 s, 55℃反应 30 s, 72℃反应 45 s,共 40 个循环数	[13]
AOB	amoA-1f/amoA-2r	GGGCTTTCTACTGCTGGT /CCCTCKGSAAGCCTTCTTC	95℃反应 3 min, 94℃反应 30 s, 55℃反应 30 s, 72℃反应 1 min,共 35 个循环数	[14]
<i>Nitrospira</i> spp.	NSR1113f/NSR1264r	CCTGCTTTCAGTTGCTACCG /GTTGACGCGCTTCTACCG	95℃反应 30 s, 95℃反应 5 s, 60℃反应 30 s, 72℃反应 30 s,共 40 个循环数	[15]
<i>Nitrobacter</i> spp.	FGPS872f/FGPS1269r	TTTTTTGAGATTGCTAG /CTAAACTCAAAGGAATTGA	95℃反应 30 s, 95℃反应 5 s, 52℃反应 30 s, 72℃反应 40 s,共 40 个循环数	[16]

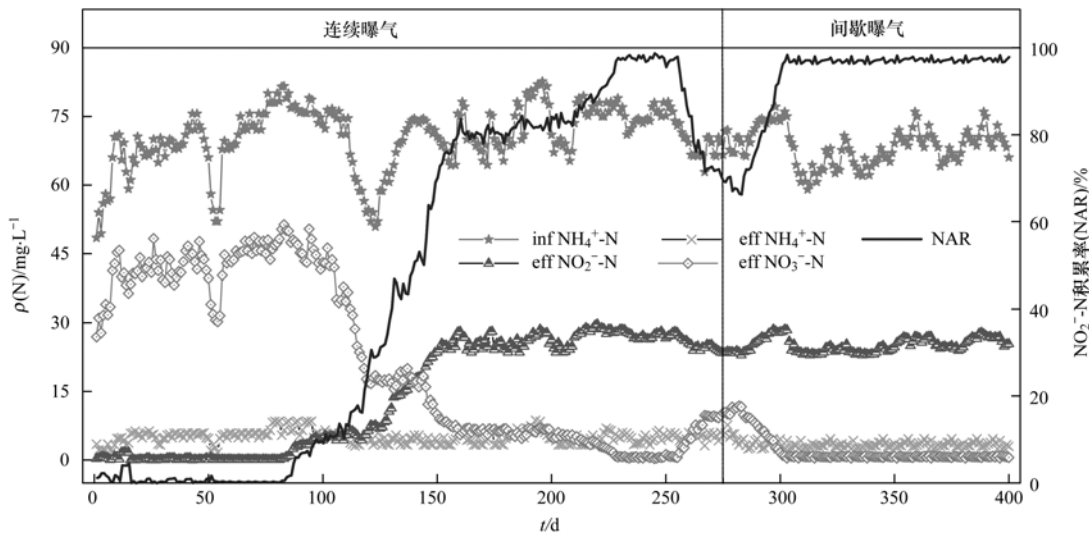


图 2 SBR A 不同曝气方式下系统NH₄⁺-N、NO₂⁻-N和NO₃⁻-N的浓度和NO₂⁻-N积累率(NAR)的变化

Fig. 2 Nitrogen concentrations and nitrite accumulation ratios (NAR = NO₂⁻-N/NO_x⁻-N × 100% ,
NO_x⁻-N = NO₂⁻-N + NO₃⁻-N) under different aeration patterns in SBR A

致污泥 SVI 值提高,污泥的沉降性能变差. 如图 3 所示, SBR A 在运行的 100 d 内,污泥的 SVI 值保持在 $80 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,在第 120 ~ 150 d,随着亚硝酸盐的累积,污泥 SVI 值逐渐增加到 $180 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,并维持在 $200 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右. 一般认为微膨胀状态下的活性污泥的 SVI 介于 $150 \sim 250 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,因此微膨胀状态基本形成. $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积某种程度上可以促进丝状菌的生长,诱发丝状菌的增殖^[18]. 对污泥进行镜检和 FISH 分析,由图 4(a) 和 4(d) 所示,引发污泥微膨胀的主要优势丝状菌为 Type 0092 型. 其容易出现在污泥负荷(以 BOD_5/MLSS 计)小于 $0.1 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,是生活污水处理厂中生长在菌胶团内部的主要菌种,对 SVI 值影响有限. 如图 3 所示,在第

160 ~ 180 d 污泥 SVI 值突然下降到 $105 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,并在接下来的 20 d 内迅速下降到 $60 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右. 微膨胀状态并没有维持多久,显微镜观察 Type 0092 型丝状菌基本消失,反应器内的污泥絮体结构细小紧密. 这是由于 Type 0092 型属于低 F/M 丝状菌,其底物贮存能力和最大生长速率比菌胶团细菌低. 而本研究采用 SBR 反应器并瞬时进水后直接进入曝气阶段,并且该阶段进水水质负荷提高,平均 F/M(以 COD/MLSS 计)约为 $0.28 \sim 0.42 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,高浓度的有机负荷使 Type 0092 处于竞争劣势地位,从而被慢慢淘汰. 另外 Casey 等^[19]曾经报道 Type 0092 型属于低 F/M 丝状菌,间歇曝气情况下比较常见,在完全曝气的情况下不会过量增殖.

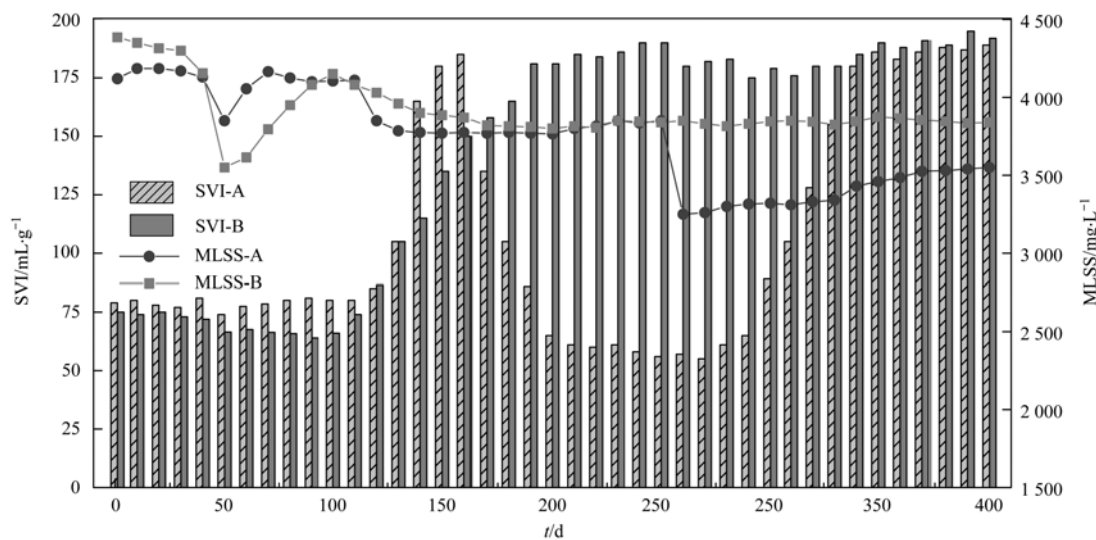


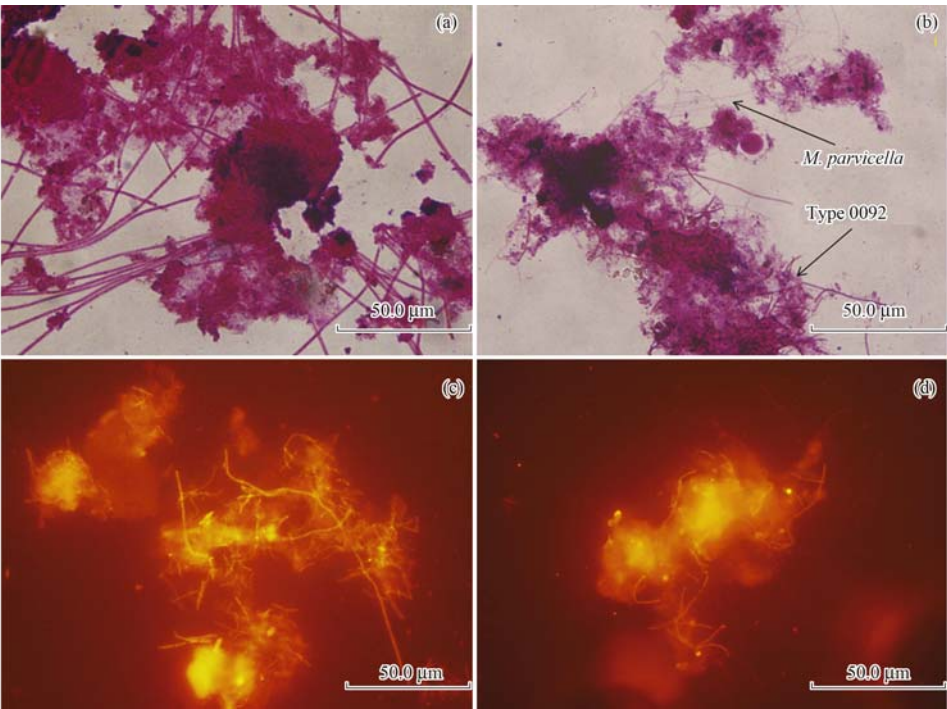
图 3 全阶段运行期间 SVI 值和污泥浓度 (MLSS) 的变化

Fig. 3 Variations in SVI value and MLSS during the continuous operational period

2.2 SBR B 交替曝气下污泥微膨胀的形成和稳定维持

运行第 101 d 将 SBR B 调整为间歇曝气,图 5 反映了 SBR B 在间歇曝气运行约 30 d 出现了稳定的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积情况,但是之后 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累率最高接近于 60%. 交替曝气可以抑制 NOB 的生长,主要是因为缺氧环境下 NOB 衰减速率更高,而进入好氧环境时 AOB 的活性恢复速率更高,因此可以快速促进 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累^[20, 21]. 但想要实现很高的 NAR,则需要对缺、好氧的时间分布比做更仔细的研究. 从图 3 可以看出第 160 d, SBR B 污泥的 SVI 值从 $70 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 增长到 $150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,并且在第 161 ~ 400 d 系统的 SVI 长期稳定在 $200 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下,交替曝气实际上也削弱了好、缺氧选择器的效果^[22],并且由于丝状菌相比于菌胶团细菌有较高的基质和 DO 亲和力以及较低的衰减系数^[23],可以在不断的缺好

氧交替环境下适度生长,实现了稳定的污泥微膨胀. 同时对污泥镜检和做 FISH 分析,如图 4(b) 和 4(c) 所示,维持污泥微膨胀的主要优势丝状菌有 Type 0092 型和 *M. parvicella*. 其中 *M. parvicella* 又名微丝菌,菌丝呈弧形或螺旋形,在菌胶团的内部或周围的混合液游离存在,为革兰氏和纳氏阳性菌. 其最适生长在污泥负荷(以 BOD_5/MLSS 计)小于 $0.2 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 、水力停留时间较长、曝气池 DO 浓度较低的环境里,因此在处理生活污水时比较常见^[24]. 交替模式下平均水力停留时间延长,反应器平均进水负荷(以 COD/MLSS 计)降低为 $0.16 \sim 0.25 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,满足 *M. parvicella* 的生长需求. 并且 Casey 等^[25]也曾报道间歇曝气的活性污泥系统中,微生物交替处于好氧状态(以氧为电子最终受体)和缺氧状态(以 NO_2^- 或 NO_3^- 为电子最终受体),使得低 F/M 丝状菌(如 Type 0092 型、Type



(a) 革兰氏染色 Type 0092; (b) 革兰氏染色 Type 0092 和 *M. parvicella*; (c) 优势丝状菌 *M. parvicella* (cy3 标记的 MPA-T1-1260); (d) 优势丝状菌 Type 0092 (cy3 标记的 CFX 197)

图 4 革兰氏染色和带有荧光标记寡核苷酸探针的特异性丝状菌 FISH 照片

Fig. 4 Gram stain and typical FISH images of the filamentous bacteria with fluorescently labeled rRNA-targeted oligonucleotide probes

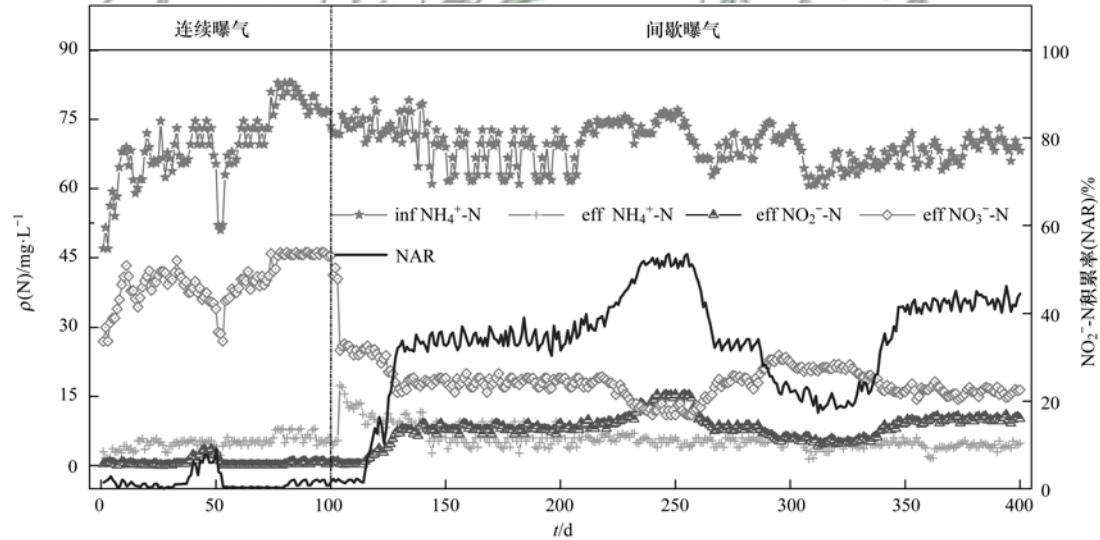


图 5 SBR B 不同曝气方式下系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率(NAR)的变化

Fig. 5 Nitrogen concentrations and nitrite accumulation ratios (NAR = $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NO}_x^-\text{-N}$ 100%, $\text{NO}_x^-\text{-N} = \text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$) under different aeration patterns in SBR B

0041 型、*M. parvicella*) 处于竞争优势. 另外,一氧化氮理论认为反硝化过程中菌胶团细菌产生的 NO 会抑制其对有机物的摄取,而丝状菌无法将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 还原为 NO,因此对有机物的竞争是有利的.

2.3 SBR A 交替曝气下短程硝化和污泥微膨胀的耦合和长期稳定维持

SBR A 中 Type 0092 型丝状菌在连续曝气和高

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的环境里无法长期生长,微膨胀状态没有得到维持. 进一步考察了该环境下丝状菌生长的情况,从图 3 看出在第 201 ~ 275 d,污泥的 SVI 值仍稳定在 $60\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,污泥的沉降性没有发生明显改变. 而图 2 看出系统出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度出现较大的波动,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 从 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 稳定降低至 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但在之后运行的 20 d,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度

突然上升到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度变化不大,这反映出系统中 NOB 的活性出现恢复现象. 分析可能是由于天气原因水温突然下降至 20°C 以下,没有采取及时的加热措施,低温下 AOB 代谢速率和耗氧速率变慢,进而导致混合液中溶解氧浓度增加到 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,温度和溶解氧浓度的变化降低了对 NOB 的抑制效果,从而出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度出现了增长现象.

结合 SBR B 的实际运行情况,在运行的第 276 d 将 SBR A 由连续曝气改变为间歇曝气模式. 图 2 (276 ~ 300 d) 看出在 25 d 左右, NOB 又被完全抑制,系统恢复了 95% 以上的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率,并在之后运行的近 100 d 里稳定维持. 图 3 显示在间歇曝气运行下,污泥的 SVI 值也开始慢慢提高,在运行约达 60 d 左右,污泥 SVI 值增加到 $180 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 并在之后的 60d 里稳定维持在 $200 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下,实现了稳定的污泥微膨胀. 同时对污泥进行镜检和 FISH 分析,如图 4(b) 所示,维持微膨胀的优势丝状菌和 SBR B 相同,主要有 Type 0092 型和 *M. parvicella*,其中 Type 0092 主要生长在菌胶团内部,而 *M. parvicella* 菌大部分伸出菌胶团外部生长. 这两种丝状菌的生长特性相似,可以利用的底物也相同,因此同时出现在微膨胀状态的污泥中. 所以通过连续曝气富集 AOB 以实现高 NAR,再转为间歇曝气维持高的 NAR 并实现与微膨胀的耦合和长期稳定维持.

2.4 总氮的去除率分析

污泥发生恶性膨胀会导致脱氮效果变差,总氮去除率变低,而污泥微膨胀有利于提高总氮的去除

率^[26]. 图 6 分别反映了连续曝气和交替曝气下不同状态的污泥的 TN 的去除效果. SBR A 在第 0 ~ 250 d,随着出水亚硝酸盐的累积率提高,系统 TN 的平均去除率由 31% 提高到 57%,低氧下同步硝化反硝化细菌可以更快地利用 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为基质进行反硝化作用,从而会提高 TN 的去除率;在第 300 ~ 400 d,交替曝气下高 NAR 短程硝化耦合污泥微膨胀的形成, TN 去除率达到 66% 左右. 相比于短程硝化的情况下,微膨胀污泥可以提高将近 8% 的 TN 去除率. 微膨胀状态由于丝状菌在絮体内部适量生长,污泥絮体体积变大,阻碍了溶解氧在絮体内部扩散,从而有助于污泥同步硝化反硝化作用^[27]. 另外有研究报道 *M. parvicella* 可以利用亚硝酸氮作为电子受体来吸收油酸,从而有助于提高 TN 的去除率^[28], 本实验引发污泥微膨胀的优势丝状菌恰好为 *M. parvicella*,且大多伸出絮体表面,更有利于吸收混合液中的有机质,与文献报道相符.

SBR B 在第 0 ~ 100 d 内连续曝气全程硝化阶段, TN 去除率约为 31% 与 SBR A 相近;在第 101 ~ 120 d 间歇曝气模式下,无明显 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积和污泥微膨胀发生,其 TN 的去除率小幅度上涨到 35% 左右,主要是因为缺氧段反硝化细菌反硝化作用;在第 150 ~ 400 d 发生稳定的污泥微膨胀阶段,平均 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积率约为 40% ~ 55%, TN 的去除率维持在 53% ~ 58%. 由此可以得出在无高的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积的情况下,微膨胀相对于正常不膨胀状态的污泥 TN 的去除率可以提高近 18% ~ 20% 左右.

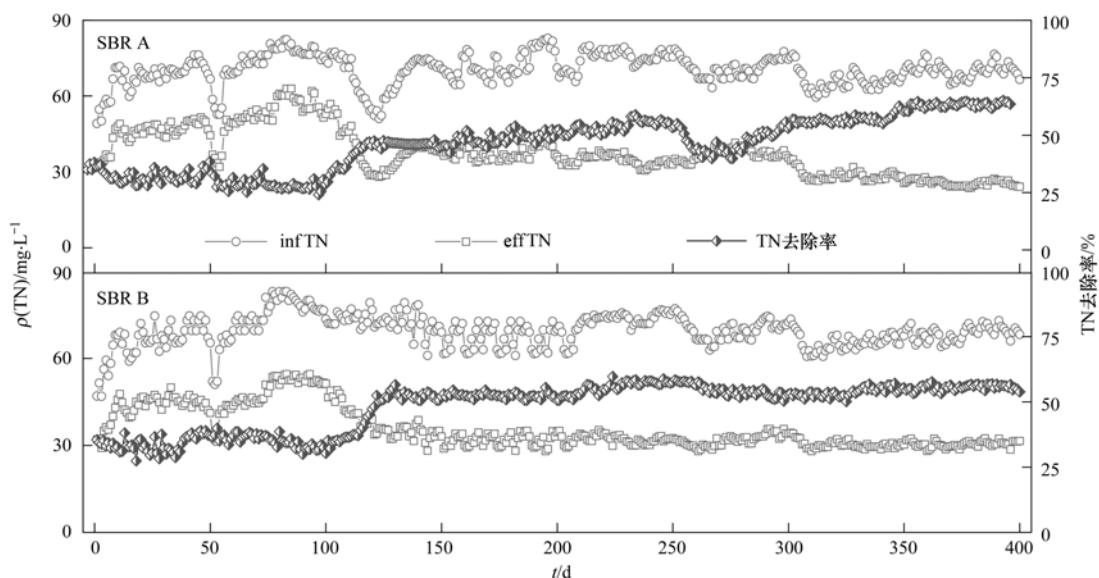


图 6 全阶段运行期间 TN 浓度和去除率的变化

Fig. 6 Variations in TN concentration and removal rate during continuous operational periods

2.5 硝化菌群结构的变化

图7反映了SBR A和SBR B在典型期间内AOB和NOB占全菌比例的变化,两个反应器分别取接种污泥初期、稳定形成高NAR阶段、NAR下降和恢复阶段中的污泥做Q-PCR分析. SBR A种泥初期AOB、NOB分别占全菌的0.53%和17.5%,随着NAR达到95%,AOB的比例上涨到1.17%,NOB的比例下降到6.55%.由于温度和DO的突然变化,NAR出现一定程度的下降,此时AOB的比例下降到0.93%,而NOB的比例提高到8.59%.间歇曝气的长期作用下,NAR恢复到95%以上,此时AOB的基因拷贝数(以干污泥计)由接种污泥的 $(4.9 \pm 0.18) \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高到 $(2.01 \pm 0.07) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,AOB的比例上升到2.19%,而NOB的基

因拷贝数从 $(1.63 \pm 0.63) \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $(2.95 \pm 0.1) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,NOB的比例下降到3.2%.AOB占整个硝化细菌的比例由初始的2.9%提高到40.6%,虽然仍是NOB的数量居多,但是随着后续的运行和排泥,AOB的数量会超过NOB的数量成为优势硝化菌.SBR B的NAR变化幅度不大,AOB的基因拷贝数由接种污泥的 $(7.9 \pm 0.23) \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高到 $(1.4 \pm 0.09) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,AOB初期占全菌比例为0.83%,后期间歇曝气在1%~2%波动,而NOB的数量从 $(1.72 \pm 0.81) \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降至 $(1.0 \pm 0.1) \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,NOB的比例由18.05%下降到11%,AOB占硝化菌群的比例由初期的4.3%到12.2%,相对于SBR A富集较为缓慢.

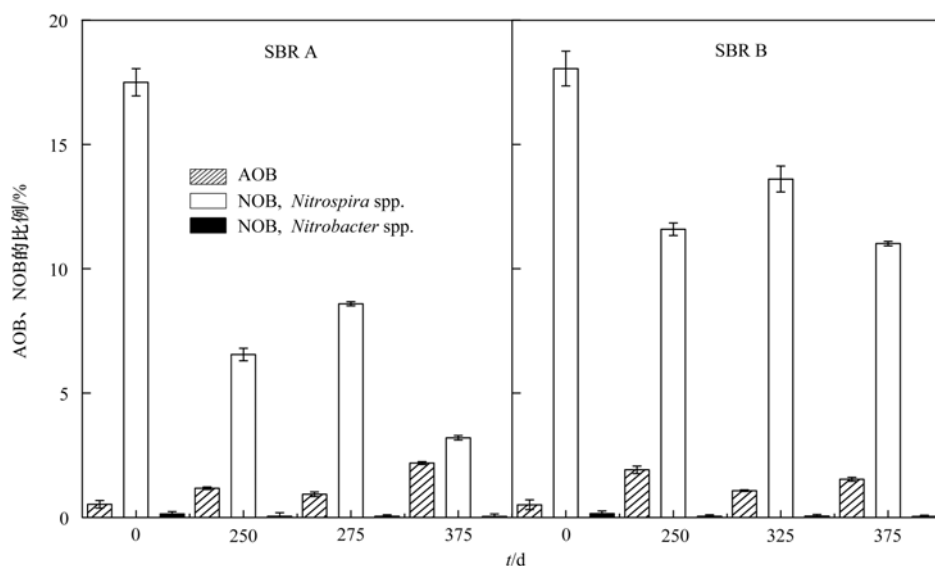


图7 典型硝化阶段AOB、NOB占全菌比例的变化

Fig. 7 Relative abundance of AOB and NOB in total bacteria during a typical nitrification phase

3 结论

(1)在低DO连续曝气的短程硝化SBR工艺中,以Type 0092为优势丝状菌形成的污泥微膨胀无法长期稳定维持,进水浓度梯度高,好氧选择器作用抑制了Type 0092菌的生长.

(2)缺、好氧比为15 min:30 min的间歇曝气模式对NOB有一定的抑制作用,相比于连续曝气富集AOB能力较弱;但可以引发以*M. parvicella*和Type 0092为优势丝状菌稳定的污泥微膨胀,污泥SVI可以长期稳定在170~200 mL·g⁻¹之间.

(3)污泥微膨胀和短程硝化(NAR>95%)可以在间歇曝气下长期耦合,相比于单独的短程硝化和微膨胀分别可以提高TN去除率约为8%和10%,

而相比于全程硝化不膨胀的污泥可以提高约31%.

参考文献:

- [1] 陈滢,彭永臻,刘敏,等.营养物质对污泥沉降性能的影响及污泥膨胀的控制[J].环境科学,2004,25(6):54-58.
Chen Y, Peng Y Z, Liu M, et al. Effect of nutrient on sludge settling property and bulking controls [J]. Environmental Science, 2004, 25(6): 54-58.
- [2] 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.
- [3] 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.
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.
- [4] Guo J H, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Stable limited filamentous

- bulking through keeping the competition between floc-formers and filaments in balance [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **103** (1): 7-15.
- [5] Blackburne R, Yuan Z G, Keller J. Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor[J]. *Biodegradation*, 2008, **19**(2): 303-312.
- [6] 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.
- [7] 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.
- 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.
- [8] Yang Q, Peng Y Z, Liu X H, *et al.* Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(23): 8159-8164.
- [9] 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.
- [10] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology [J]. *Journal of Bacteriology*, 1990, **172**(2): 762-770.
- [11] Levantesi C, Rossetti S, Thelen K, *et al.* Phylogeny, physiology and distribution of '*Candidatus Microthrix calida*', a new *Microthrix* species isolated from industrial activated sludge wastewater treatment plants [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(9): 1552-1563.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Yapsakli K, Aliyazicioglu C, Mertoglu B. Identification and quantitative evaluation of nitrogen-converting organisms in a full-scale leachate treatment plant [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, **92**(3): 714-723.
- [16] Nittami T, Ootake H, Imai Y, *et al.* Partial nitrification in a continuous pre-denitrification submerged membrane bioreactor and its nitrifying bacterial activity and community dynamics[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **55**(2): 101-107.
- [17] Laanbroek H J, Bodelier P L E, Gerards S. Oxygen consumption kinetics of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter hamburgensis* grown in mixed continuous cultures at different oxygen concentrations[J]. *Archives of Microbiology*, 1994, **161**(2): 156-162.
- [18] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. *Water Research*, 2009, **43**(3): 563-572.
- [19] Casey T G, Wentzel M C, Loewenthal R E, *et al.* A hypothesis for the cause of low F/M filament bulking in nutrient removal activated sludge systems [J]. *Water Research*, 1992, **26**(6): 867-869.
- [20] Ma Y, Domingo-Félez C, Plósz B G, *et al.* Intermittent aeration suppresses nitrite-oxidizing bacteria in membrane-aerated biofilms: a model-based explanation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(11): 6146-6155.
- [21] Komaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7245-7253.
- [22] 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.
- [23] Lou I C, de los Reyes III F L. Integrating decay, storage, kinetic selection, and filamentous backbone factors in a bacterial competition model[J]. *Water Environment Research*, 2005, **77** (3): 287-296.
- [24] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge—a critical review [J]. *Water Research*, 2004, **38**(4): 793-817.
- [25] Casey T G, Wentzel M C, Ekama G A, *et al.* A hypothesis for the causes and control of anoxic-aerobic (AA) filament bulking in nutrient removal activated sludge systems[J]. *Social Studies of Science*, 1994, **42**(5): 709-731.
- [26] 吴昌永, 彭永臻, 彭轶. A²O 工艺中的污泥膨胀问题及恢复研究[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(12): 1074-1078.
- Wu C Y, Peng Y Z, Peng Y. Activated sludge bulking and control in A²O process [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(12): 1074-1078.
- [27] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Nitrification and denitrification of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A²O) process at ambient temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8074-8082.
- [28] Andreassen K, Nielsen P H. Growth of *Microthrix parvicella* in nutrient removal activated sludge plants: studies of *in situ* physiology[J]. *Water Research*, 2000, **34**(5): 1559-1569.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	 HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	 YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	 FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	 SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	 ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	 ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	 ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	 AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	 HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	 PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)