

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚兰, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响

马航^{1,2}, 朱强^{1,2}, 朱亮^{1,2}, 李祥^{1,2*}, 黄勇^{1,2}, 魏凡凯^{1,2}, 杨朋兵^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215002; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215002)

摘要: 室温下 (19~24℃), 采用硫自养反硝化生物膜反应器和厌氧污泥反应器, 接种厌氧活性污泥, 研究了反应器类型和单质硫尺寸对硫自养反硝化反应器启动的影响。结果表明, 生物膜反应器经过 65 d 运行后获得稳定的脱氮效能, 在进水 NO_3^- -N 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 3.3 h, NO_3^- -N 去除率为 91%, TN 去除率为 77%, TN 去除速率为 $0.67 \sim 0.83 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。对于厌氧污泥反应器, 随着进水 NO_3^- -N 负荷的提高, 污泥产气量的增加导致了污泥上浮。在进水 NO_3^- -N 浓度为 $185 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 3.3 h 的条件下, 获得最大去除速率 $1.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 但是出水 NO_3^- -N 浓度的增加导致出水水质恶化, 且污泥上浮严重影响了反应器的稳定运行。分别采用 0.8 mm、3.0 mm 的单质硫颗粒作为反应器启动的电子供体, 于批次反应器中进行试验。试验结果表明, 采用 0.8 mm 的单质硫颗粒能够获得较高的 NO_3^- -N、TN 去除率, 出水 NO_2^- -N 浓度也明显低于采用 3.0 mm 的单质硫颗粒作为电子供体的反应器。

关键词: 硫自养反硝化; 反应器类型; 单质硫; 反应器启动; 去除速率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2235-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.06.029

Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor

MA Hang^{1,2}, ZHU Qiang^{1,2}, ZHU Liang^{1,2}, LI Xiang^{1,2*}, HUANG Yong^{1,2}, WEI Fan-kai^{1,2}, YANG Peng-bing^{1,2}

(1. School of Environment Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215002, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215002, China)

Abstract: The effect of element sulfur particle size and type of the reactor on sulfur autotrophic denitrification reactor start-up was researched at room temperature (19–24℃) by using sulfur autotrophic denitrification bio-membrane reactor and anaerobic sludge bed biofilm reactor and inoculating anaerobic sludge. The research indicated that after 65 d operation, the bio-membrane reactor gained steady denitrification efficiency. With an influent NO_3^- -N of $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and an HRT of 3.3 h, the removal efficiencies of NO_3^- -N and TN were 91% and 77%, and the removal rate of TN was $0.67 \sim 0.83 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. The increase of volumetric loading rate of NO_3^- -N and production of nitrogen gas led to the floating of sludge in the anaerobic sludge bed biofilm reactor. With an influent NO_3^- -N of $185 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and an HRT of 3.3 h, the maximum removal rate of NO_3^- -N of $1.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ was attained in anaerobic sludge bed biofilm reactor. But the increase of effluent NO_3^- -N and NO_2^- -N lowered the quality of effluent water seriously, and the floating of sludge affected the steady operation of the anaerobic sludge bed biofilm reactor. Sulfur particles with particle size of 0.8 mm and 3.0 mm were used as electron donors for start-up of two batch reactors. The experiment results indicated that the reactor which used sulfur particle size of 0.8 mm attained higher removal efficiency of NO_3^- -N and TN, and its effluent accumulated less NO_2^- -N compared with the reactor which used particle size of 3.0 mm.

Key words: sulfur-based autotrophic denitrification; type of reactor; element sulfur; start-up of reactor; removal rate

农业化肥的过多使用以及生活污水的处理不当, 导致了地表水和地下水硝酸盐浓度的提高, 超出了饮用水标准^[1]。硝酸盐本身没有危害, 但是转化成为亚硝酸盐后会导致人体中毒^[2]。含硝酸盐污水若直接排放到环境中, 会引起地表水中氮、磷浓度超标, 导致水体出现富营养化状态^[3]。由于严格的排放标准, 对地表水和地下水的脱氮处理刻不容缓^[4]。

传统的硝酸盐去除一般采用反硝化法, 即投加

有机碳源提供电子供体, 将硝酸盐转化为氮气。虽然该方法能够达到较高的脱氮效率, 但是经济成本较高, 污泥产量大, 有机物的剩余可能带来其他潜在

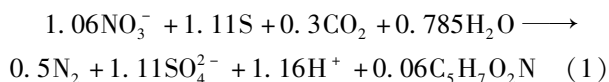
收稿日期: 2015-12-22; 修订日期: 2016-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478284, 51408387); 2015 年江苏省大学生创新实践训练计划项目 (201510332029Y); 江苏省特色优势学科二期立项项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州市分离净化材料与技术重点实验室项目 (SZS201512)

作者简介: 马航 (1996~), 男, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: mhllymhh@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

问题^[4,5]. 相比于传统反硝化, 硫自养反硝化无需外加有机碳源、污泥产量低, 且元素硫价格低廉, 节约成本^[6~8]. 所谓硫自养反硝化是指采用单质硫作为电子供体, 在微生物的作用下将水中 NO_3^- -N还原成 N_2 , 达到脱氮的目的. Koenig 等^[9]研究硫自养反硝化动力学表明, 当进水中无氨氮时, 硫自养反硝化的反应方程式如下:



从方程式可以看出, 微生物同化 CO_2 , 利用单质硫作为电子供体, 还原水中的 NO_3^- -N, 将其转化为 N_2 , 同时合成有机物供自身代谢繁殖. Steudel 等^[10]在对单质硫的水溶性的研究中表明单质硫在水中最大溶解度为 $0.16 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此单质硫较低的溶解度可能会影响硫自养反硝化的脱氮效能. 对于不同尺寸的单质硫颗粒, 对硫自养反硝化反应器启动的影响也可能不同. 因此, 寻找合适的单质硫颗粒尺寸对于硫自养反硝化反应器的启动具有重要意义.

刘续等^[11]在水力负荷对微污染水自养反硝化影响的研究中, 对比了细高型反应器和矮胖型反应器的运行参数和脱氮效能, 表明两种类型的反应器的最小HRT与水力负荷均不相同, 反应器还存在污泥上浮等问题. 王晖等^[12]对比了以生物活性炭为载体的反应器和厌氧污泥反应器的脱氮效能, 表明生物活性炭反应器可获得更高的脱氮效能. 由此可见, 不同的反应器类型对反应器的脱氮效能产生的影响不相同.

鉴于国内关于单质硫的尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动影响的研究甚少, 本试验接种厌氧污泥, 采用单质硫作为电子供体, 研究硫自养反硝化反应器的启动及单质硫颗粒尺寸、反应器类型对启动过程的影响, 这对于硫自养反硝化应用于工程治污具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行参数

反应装置为柱状由有机玻璃制成, 如图1所示, 有效体积2 L. 反应器配有搅拌及三相分离装置, 搅拌速度 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 进水方式为连续流, 进水流量由兰格蠕动泵控制. 本试验接种污泥为厌氧污泥, 反应器环境温度稳定在 $19 \sim 24^\circ\text{C}$.

1.2 试验材料

进水模拟高浓度含氮废水, 选用单质硫作为硫

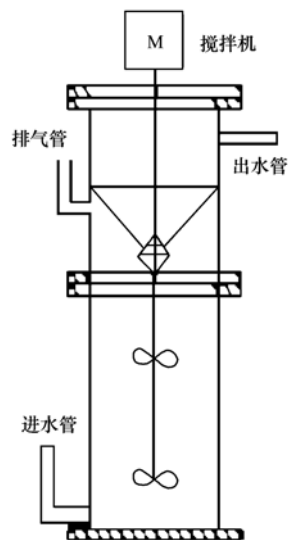


图1 反硝化反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the denitrification reactor

自养反硝化电子供体. 废水主要组成($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $570 \sim 1\,080 \text{ KNO}_3$, $27 \text{ KH}_2\text{PO}_4$, $20 \text{ MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 以及微量元素($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $5\,000 \text{ EDTA}$, $5\,000 \text{ MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $3\,000 \text{ FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $50 \text{ CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $40 \text{ NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $20 \text{ H}_3\text{BO}_3$, $20 (\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$, 10 CuSO_4 , 3 ZnSO_4 . 同时加入 $6\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 提供碱度和无机碳源.

1.3 试验方法

室温下, 硫自养反硝化反应分别采用厌氧污泥反应器和生物膜反应器启动, 通过监测反应器内污泥流态、出水水质及反应器的运行效果来探究不同类型的反应器对硫自养反硝化启动的影响.

在此基础上, 从反应器内取适量污泥, 分别采用 0.8 mm 和 3.0 mm 的单质硫颗粒作电子供体, 于批试反应器a、b中进行试验, 通过对比反应器的 NO_3^- -N去除效率来探究不同粒径的单质硫颗粒对硫自养反硝化脱氮效能的影响.

进水采用当地自来水配制, 经多次测定, 本试验自来水中 SO_4^{2-} -S浓度为 $25 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.4 分析项目及方法

每日取反应器进水、出水, 过滤后采用离子色谱(戴安 IC-900)测定 NO_3^- -N、 NO_2^- -N和 SO_4^{2-} -S浓度, 采用pH计(pHS-3E)测定进、出水pH值.

2 结果与讨论

2.1 硫自养反硝化生物膜反应器的启动

采用生物膜反应器启动, 设置初始进水 NO_3^- -N浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT为4.2 h. 如图2所示, 运行

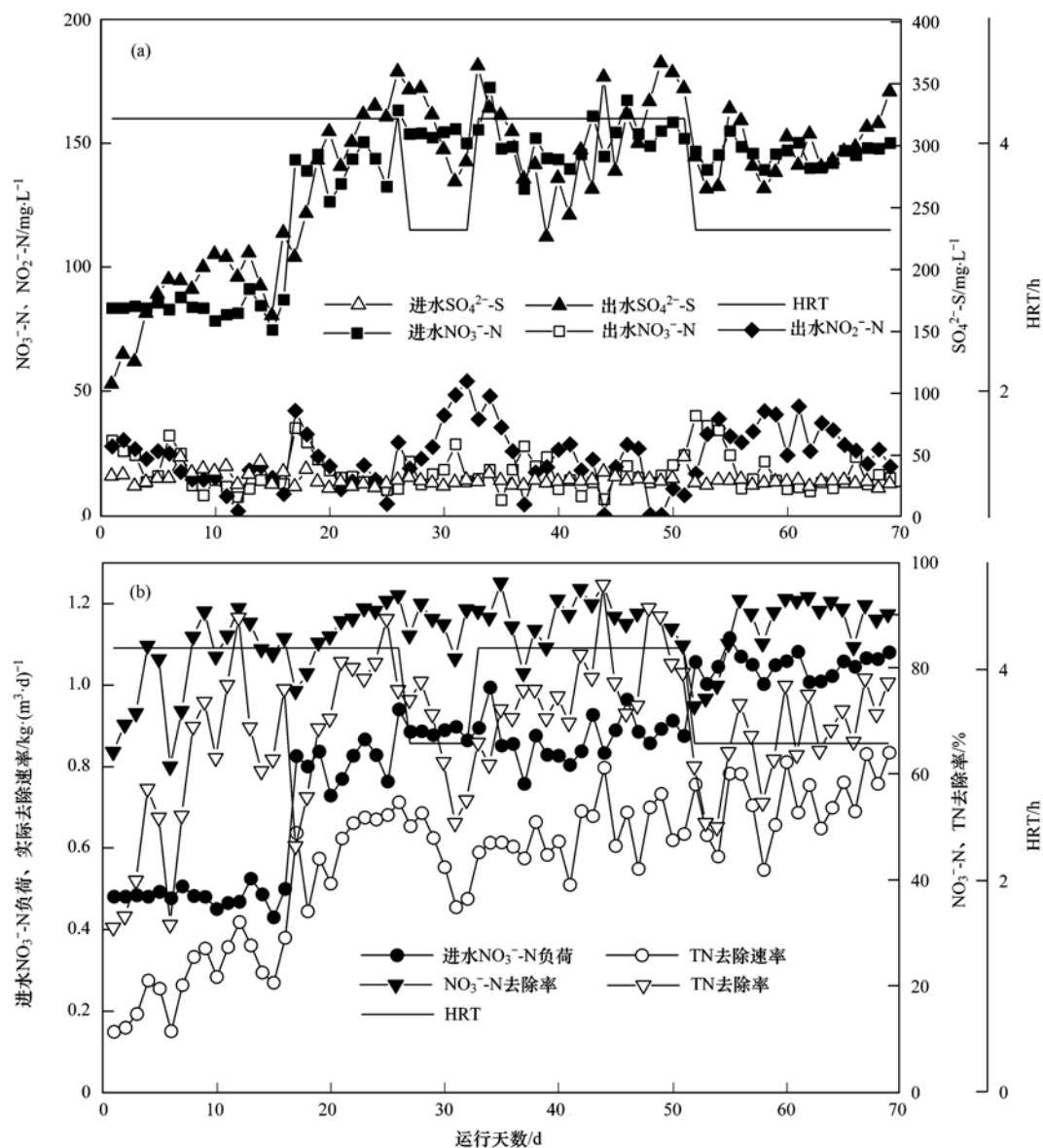


图2 硫自养反硝化生物膜反应器的运行

Fig. 2 Operation of the sulfur autotrophic denitrification biofilm reactor

2 d, 出水 NO_3^- -N浓度为25~30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- -N浓度为35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} -S浓度为100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N去除率为64%, TN去除率仅为30%, 可能是反应器运行初期内部体系不稳定。当反应器运行至第6~10 d时, 出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N分别逐渐下降至12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水水质变好。此时进水 NO_3^- -N负荷为0.5 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 实际去除速率为0.38 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。在第17 d, 将进水 NO_3^- -N浓度提高至150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, 出水 NO_3^- -N和 NO_2^- -N分别上升至30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 降低了出水水质。继续运行, 测得进水 NO_3^- -N和 NO_2^- -N又恢复至原有水平, NO_3^- -N去除率为85%~90%, TN去除率为70%~80%, 说明生物膜反应器的抗冲击负荷能力较强。

在第43 d时, 保持进水 NO_3^- -N为150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 缩短HRT至3.3 h, 之后出水 NO_2^- -N浓度有明显的上升, 出水 SO_4^{2-} -S浓度由330 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至260 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。为了探究HRT对反应器脱氮效能的影响, 恢复HRT至4.2 h, 出水 NO_2^- -N浓度明显下降, 出水 SO_4^{2-} -S浓度恢复至330 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明较高的HRT可以提高出水水质。反应器运行至48 d时, 出水 NO_2^- -N浓度降至0, 出水 SO_4^{2-} -S浓度提升至350 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此时缩短HRT至3.3 h, 出水 NO_3^- -N和 NO_2^- -N浓度分别上升至40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但2 d后出水 NO_3^- -N浓度下降到10~15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 NO_2^- -N无明显变化。稳定运行15 d后, 出水 NO_2^- -N浓度逐渐下降至

20 ~ 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器 NO_3^- -N去除率维持在 90% ~ 92%, TN 去除率为 72% ~ 82% 之间, 进水 NO_3^- -N 负荷为 $1.08 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, TN 去除速率为 $0.65 \sim 0.81 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 另外, 整个过程中污泥产量较小, 集泥装置中无明显的污泥堆积.

李璟等^[13]采用硫/沸石固定床去除硝酸盐, 研究表明在硫与沸石的体积比为 1:2, HRT 为 2 h 时, 保持进水 NO_3^- -N 为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可达到最大去除速率 $0.32 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 李天昕等^[14]利用硫/石灰石固定床工艺处理低碳高氮废水, 硫和石灰石的体积比为 1:1, HRT 为 3.2 h, 进水 NO_3^- -N 浓度为 $40.92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可达到最大去除速率 $0.28 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 本试验中出水有 NO_2^- -N 的积累, 进水 NO_3^- -N 浓度为 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 为 3.3 h, 容积负荷最大可达 $0.81 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 适用于处理含高浓度 NO_3^- -N 废水.

本试验中, 出水始终存在 NO_2^- -N 的积累, 在第 27 d 缩短 HRT 至 3.3 h, 在之后的 6 ~ 7 d 出水 NO_2^- -N 明显增多, 第 33 d 将 HRT 恢复至 4.2 h, 出水 NO_2^- -N 降低至原浓度. 为了进一步探究 HRT 对 NO_2^- -N 的积累的影响, 第 52 d 再次将 HRT 缩短至 3.3 h, 之后几天出水 NO_2^- -N 浓度再次升高. Sahinkaya 等^[15]在硫自养反硝化的批试试验中表明, 在较高的进水 NO_3^- -N 负荷条件下, NO_3^- -N 的去除速率是 NO_2^- -N 去除速率的 3 倍. 本试验中, 随着进水 NO_3^- -N 负荷的提升, 短期内 NO_2^- -N 的积累也越来越明显, 因此 NO_2^- -N 去除速率小于 NO_3^- -N 的去除速率是 NO_2^- -N 积累的主要原因.

Sahinkaya 等^[16]利用生物膜反应器实现了完全硫自养反硝化, 控制温度为 $32 \sim 34^\circ\text{C}$, 进水 NO_3^- -N 浓度为 $20 \sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 无 NO_2^- -N 积累, HRT 最低可至 5 h, NO_3^- -N 容积负荷最高达 $0.24 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 有研究表明反应温度在 30°C 左右可能比 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 条件下的脱氮效率更高^[6]. 本试验中反应温度一直为室温 ($19 \sim 25^\circ\text{C}$), 因此温度可能为硫自养反硝化过程中 NO_2^- -N 去除率提升的限制因素. 此外, 李天昕等^[14]指出 HRT 过短时容易导致 NO_2^- -N 的积累. 欧阳丽华等^[17]在对包埋固定化微生物的硫自养反硝化研究表明, 影响硫自养反硝化效率的因素主要有温度、进水浓度和 HRT, 温度的影响最大, 其次是 HRT, 且最低 HRT 取决于温度; 在进水 NO_3^- -N 负荷一定的情况下, 缩短 HRT 比提高进水 NO_3^- -N 浓度对反应器脱氮效率的影响更大. 袁玉玲等^[18]在利用硫磺/石灰石自养反硝化系统脱氮除磷的研究中表

明, 较低的 HRT 对 NO_3^- -N 去除率影响不大, 对 TN 去除率的影响较大, 容易导致出水 NO_2^- -N 的积累, 出水水质变差. 反应器的高度也会影响硫自养反硝化的脱氮性能, 对于上流式反应器, 随着反应器高度的增加, NO_3^- -N 的浓度逐渐下降^[5,9], 对于不同类型的反应器, 最适 HRT 可能会有所不同. 本试验中反应器有效容积为 2 L, HRT 最低为 3.3 h, 在进水 NO_3^- -N 为 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 可能会导致 NO_2^- -N 反应生成 N_2 的反应时间不足, 从而导致 NO_2^- -N 的积累. 适当提高 HRT 可以有效地减少出水 NO_2^- -N 含量, 改善出水水质.

2.2 硫自养反硝化厌氧活性污泥反应器的启动

设置进水 NO_3^- -N 浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 为 3.3 h, 反应器在室温下运行 (图 3). 开始时反应器运行效果不稳定, 出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度较高, 出水 SO_4^{2-} -S 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 去除率为 52%, TN 去除率仅为 15% ~ 20%. 随着反应器的运行, 出水 NO_2^- -N 下降至 $25 \sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 第 12 d, 出水 NO_2^- -N 下降至 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水水质大有改善. 从第 13 d 开始, 逐步提高进水 NO_3^- -N 浓度, 2 d 后反应器上部有大量污泥上浮, 出水 NO_2^- -N 浓度升高至 $45 \sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} -S 浓度为 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水水质变差. 为了保持反应器良好的脱氮效能, 将上浮污泥移入反应器底部, 2 d 后, 出水 NO_2^- -N 降低至 0, NO_3^- -N 浓度降低至 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 SO_4^{2-} -S 上升至 $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥上浮可能导致反应器脱氮效能的下降. 第 25 d 将进水 NO_3^- -N 浓度提高至 $185 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 NO_3^- -N 浓度提升至 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 浓度无明显变化, 获得最大去除速率 $1.1 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 第 29 ~ 32 d 污泥上浮严重, 出水 NO_3^- -N 上升至 $100 \sim 130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} -S 下降至 $150 \sim 250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 再次将上浮污泥移入反应器下部, 1 ~ 2 d 后, 出水 NO_3^- -N 逐渐下降至 $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} -S 浓度上升至 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N、TN 去除率为 85% ~ 90%. 第 37 d 将进水 NO_3^- -N 浓度提高至 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥大量上浮, 再次处理后出水 NO_3^- -N 浓度下降至 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N、TN 去除率为 75% ~ 80%. 第 45 d 将进水 NO_3^- -N 浓度提升至 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥大量上浮, 出水 NO_3^- -N 提升至 $140 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 NO_2^- -N 由 0 提升至 $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 尽管第 51 d, 出水 NO_3^- -N 下降至 $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 2 d 后反应器内污泥再次上浮, 出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度明显提升, 严重降低了出水水质.

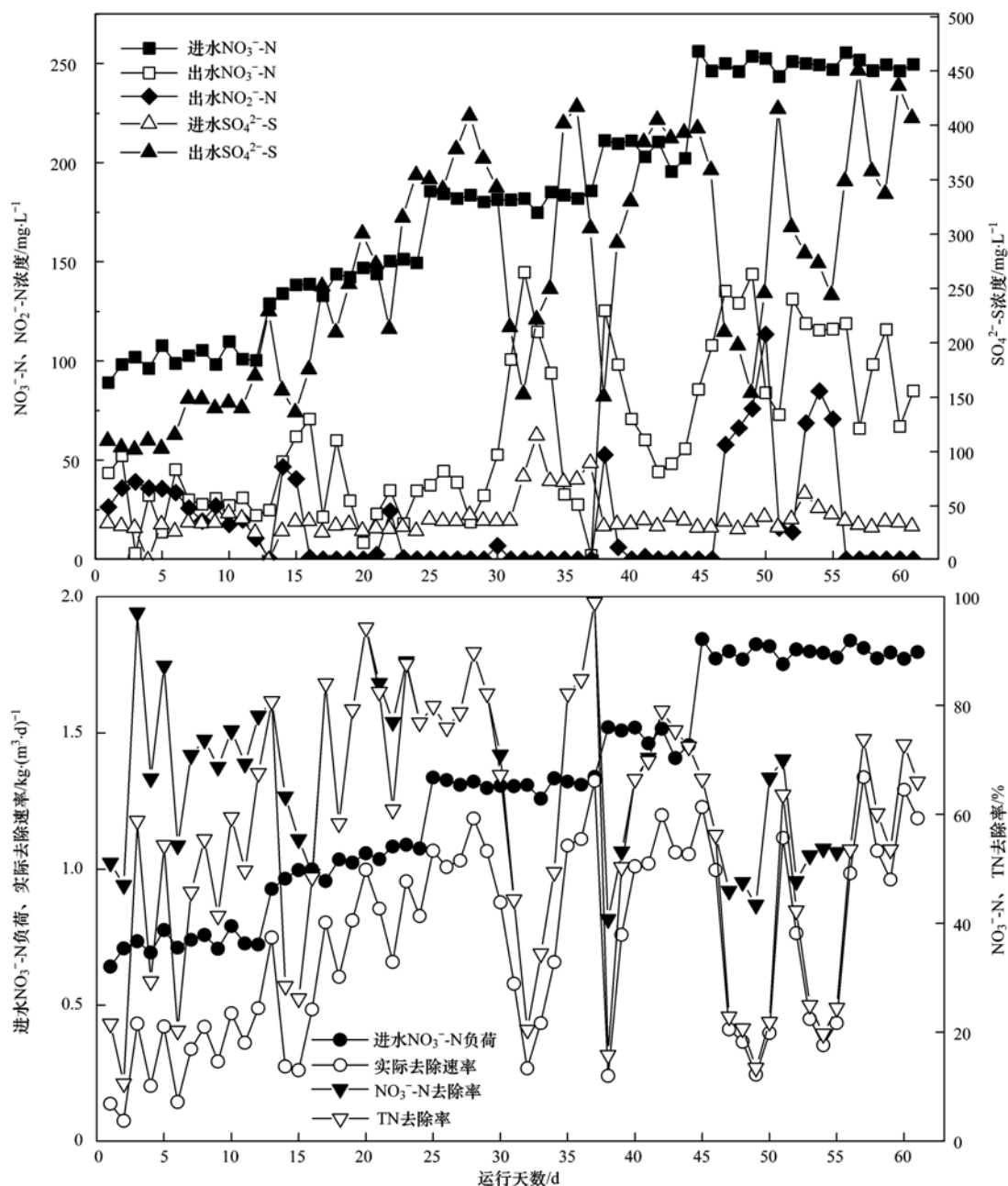


图3 厌氧活性污泥反应器的运行

Fig. 3 Operation of anaerobic activated sludge reactor

Batchelor 等^[19]在对硫自养反硝化的动力学模型的研究中表明硫自养反硝化发生的 3 个条件: ①元素硫溶于水; ② NO_3^- -N 能够传输到生物膜表面; ③ NO_3^- -N 能够穿过生物膜参与反硝化反应. 单质硫的溶解度低成为硫自养反硝化效能的限制因素, 因此要使硫自养反硝化反应进行, 必须使微生物和单质硫充分地接触. 在本试验中, 污泥上浮导致反应器内部微生物与单质硫接触不充分, 严重降低了传质效率, 导致反硝化效能的下降. 由反应式(1)得, 在硫自养反硝化过程中会产生 N_2 , 这可能是导

致污泥大量上浮的主要原因. 此外, 刘续等^[11]在研究水力负荷对微污染水自养反硝化的影响中表明, 较高的水力负荷使得对反应器中微生物的冲刷效果明显, 一些悬浮态的微生物会随水流流出反应器, 导致系统中的生物量减少, 影响反应器的反硝化速率. 本试验中厌氧活性污泥反应器的 HRT 一直为 3.3 h, 始终伴随着污泥上浮的问题, 且随着 TN 去除率的提升, 污泥中微生物产气增加, 导致污泥上浮现象严重. 污泥的上浮限制了微生物与基质的充分接触, 明显降低了脱氮效能.

2.3 生物膜反应器与厌氧污泥反应器的运行效果对比

厌氧污泥反应器最大 TN 去除速率可达 $1.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 生物膜反应器最大 TN 去除速率可达 $0.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ (图 4). 就 TN 去除速率而言, 厌氧污泥反应器略优于生物膜反应器, 且厌氧污泥反应器在无明显污泥上浮的情况下, 出水无 NO_2^- -N 的积累. 根据 Batchelor 等^[19]提供的动力学模型, 推测相对于生物膜反应器, 厌氧污泥反应器的传质效率更高, 反应器中的微生物能够充分地与单质硫和基质接触, 反硝化速率更快. 但是随着厌氧污泥反应器的运行和进水 NO_3^- -N 负荷的提高, 污泥上浮的现象也越来越严重, 导致了实际去除速率的不稳定, 影响微生物的正常生长. 生物膜反应器能够很好地解决污泥上浮问题, 保持微生物的正常生长和反应器的稳定运行, 这对实际工程和硫自养反硝化的后续研究有重要意义.

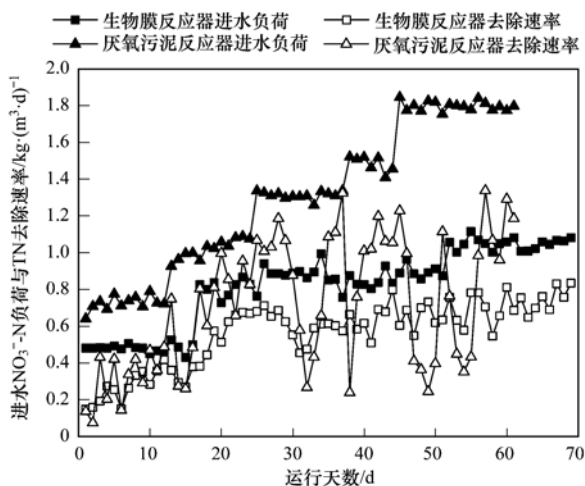


图 4 生物膜反应器与厌氧污泥反应器运行效果的对比

Fig. 4 Comparison of denitrification between biofilm reactor and anaerobic sludge reactor

2.4 单质硫的尺寸对硫自养反硝化脱氮效能的影响

为研究投加单质硫的尺寸对反应器脱氮效能的影响, 在室温下, 于批试反应器 a、b 中接种厌氧污泥, 分别以 3.0 mm 和 0.8 mm 的单质硫颗粒作为电子供体, 设置进水 NO_3^- -N 浓度为 $80 \sim 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 3 h.

对于批试反应器 a, 如图 5(a) 所示, 开始时出水 NO_3^- -N 浓度为 $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 去除率为 60%, TN 去除率仅为 20%, 出水 SO_4^{2-} -S 浓度为 $110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 运行至第 4 d, 出水 NO_2^- -N 浓度开始下降, SO_4^{2-} -S 浓度上升至 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 之后, 出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 浓度逐渐

降低. 第 13 d, 出水 NO_3^- -N 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 浓度为 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 去除率为 87%, TN 去除率为 71%.

批试反应器 b 则采用 0.8 mm 的单质硫粒作为电子供体. 运行 1 d 后, 出水 NO_3^- -N 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} -S 浓度为 $166 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. NO_3^- -N 去除率为 60%, TN 去除率为 30%. 第 1~4 d 出水 NO_2^- -N 无明显变化, 第 5 d 出水 NO_2^- -N 开始下降, 出水 SO_4^{2-} -S 上升至 $197 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 如图 5(b) 所示, 之后几天, 出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 逐渐下降, 出水 SO_4^{2-} -S 浓度逐渐升高, 最终出水 NO_3^- -N 浓度为 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 NO_2^- -N 浓度为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 去除率为 90%~92%, TN 去除率为 87%~88%. 在整个试验过程中, 批试反应器 a、b 均未观察到单质硫流失的现象.

文献[6]表明, 投加单质硫的量超过理论需求量的两倍时, 反硝化速率会呈线性提升, 因此本试验中投加足量单质硫, 保持单质硫的量在理论需求量的 2~3 倍. 通过对比 13 d 内反应器 a、b 的 NO_3^- -N 和 TN 去除率, 可以看出使用 0.8 mm 的单质硫颗粒作为电子供体可以更快地达到较高的脱氮效能. 在本试验中, 相对于 3.0 mm 的硫粒, 0.8 mm 的硫粒表面积较小, 比表面积较大^[20], 因此能够充分地进入生物膜, 与污泥中的微生物接触, 促进硫自养反硝化反应的进行. 目前国内关于单质硫的尺寸对硫自养反硝化脱氮效能影响的研究甚少, Koenig 等^[20]指出 TN 去除速率与硫粒的尺寸密切相关, 并通过固定床反应器做批试试验, 表明当单质硫的尺寸在 2.8~16.0 mm 之间时, 硫自养反硝化速率随着硫粒尺寸的下降而上升^[9]. 本试验对比了更小粒径的硫颗粒 (0.8 mm) 与 3.0 mm 的单质硫颗粒分别作为电子供体对反应器启动的影响. 研究表明当单质硫粒径小于 2.8 mm 时, 仍然能保持较高的脱氮效能. Koenig 等^[9]的研究中单质硫最小粒径为 2.8 mm, 可能是因为单质硫粒径过小无法采用固定床反应器启动. 同时有研究表明单质硫的比表面积是影响硫自养反硝化反应速率的重要因素^[21~24].

当单质硫颗粒的表面积较大时, 可作为微生物生长的载体, 并起到过滤基质的作用^[3], 但随着反硝化反应的进行, 硫粒逐渐被消耗, 可能会受到水流冲刷的影响^[25]; 更小粒径的单质硫颗粒表面积较小, 但相对于粒径大的硫颗粒, 有较大的比表面积, 能充分进入生物膜, 参与硫自养反硝化反应, 但单质

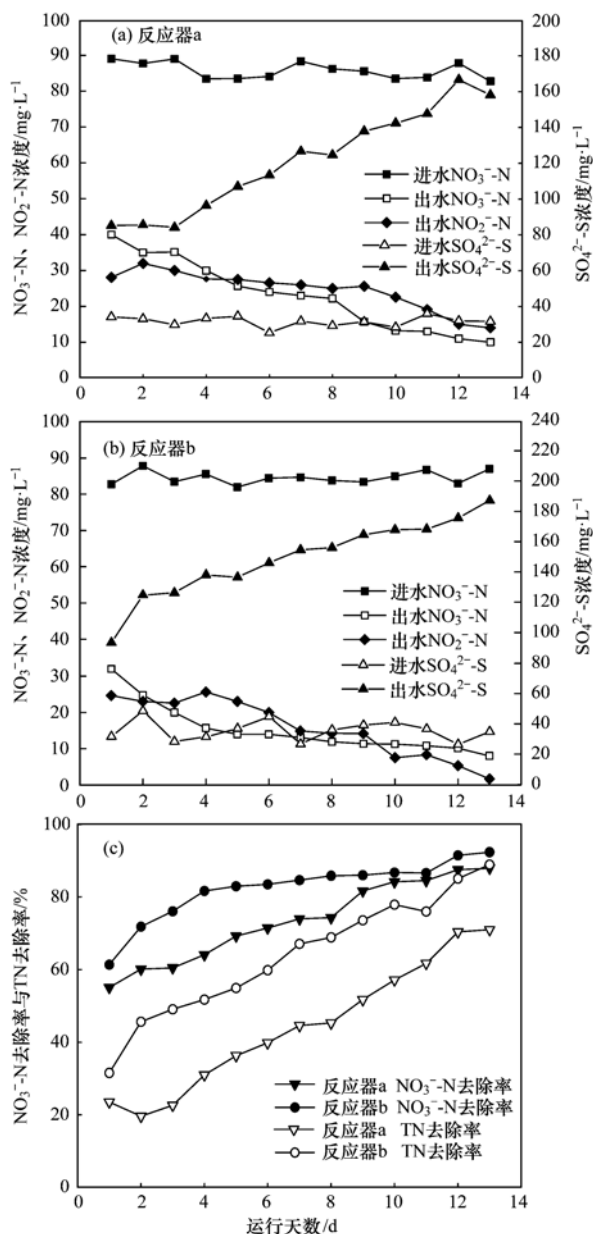


图5 3.0 mm 和 0.8 mm 的单质硫颗粒对反应器脱氮效能的影响

Fig. 5 Effect of different sulfur particle sizes (3.0 mm and 0.8 mm) on denitrification efficiency of the reactor

硫颗粒粒径过小会导致重量过小,在上流式反应器中也可能被水流冲刷。对于不同类型的反应器,不同类型的进水方式,也可能对反应器的脱氮效能产生影响。因此,在实际工程中要合理控制单质硫的投加。

3 结论

(1)室温下,在进水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 3.3 h 的条件下,生物膜反应器获得最大去除速率 $0.83 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。HRT 的适当延长可以

有效地降低出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度,改善水质。

(2)厌氧污泥反应器在进水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度为 $185 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 3.3 h 的条件下,获得最大去除速率 $1.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。当进水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度高于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,开始出现污泥上浮的现象。且在 HRT 不变时,随着进水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的提高,反应器的去除速率逐渐上升,污泥的产气量增大导致污泥上浮更严重。污泥上浮不仅降低了反应器的脱氮效率,影响了微生物的正常生长,还大大降低了出水水质。

(3)虽然厌氧污泥反应器的最大 TN 去除速率略优于生物膜反应器,但去除效率的稳定性较差,不利于反应器的稳定运行。污泥上浮导致出水水质变差,不利于含 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 废水的处理。生物膜反应器能够获得稳定的脱氮效率,出水水质远优于厌氧污泥反应器。

(4)批试试验表明,在进水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度为 $80 \sim 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 3 h 的条件下,采用 0.8 mm、3.0 mm 的单质硫颗粒作电子供体可达到 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率分别为 91% 和 87%, TN 去除率分别为 88% 和 71%。采用 0.8 mm 的单质硫颗粒可以获得更高的脱氮效能。

参考文献:

- [1] Liu H J, Jiang W, Wan D J, *et al.* Study of a combined heterotrophic and sulfur autotrophic denitrification technology for removal of nitrate in water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 23-28.
- [2] Kleinjans J C S, Albering H J, Marx A, *et al.* Nitrate contamination of drinking water: evaluation of genotoxic risk in human populations [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1991, **94**: 189-193.
- [3] 刘佃娜, 何圣兵, 周伟丽, 等. 硫自养反硝化强化垂直流人工湿地脱氮性能研究[J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(3): 14-18.
- [4] Oh S E, Yoo Y B, Young J C, *et al.* Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions [J]. *Journal of Biotechnology*, 2001, **92**(1): 1-8.
- [5] Sahinkaya E, Kilic A, Duygulu B. Pilot and full scale applications of sulfur-based autotrophic denitrification process for nitrate removal from activated sludge process effluent[J]. *Water Research*, 2014, **60**: 210-217.
- [6] Sierra-Alvarez R, Beristain-Cardoso R, Salazar M, *et al.* Chemolithotrophic denitrification with elemental sulfur for groundwater treatment [J]. *Water Research*, 2007, **41**(6): 1253-1262.
- [7] Kim E W, Bae J H. Alkalinity requirements and the possibility of simultaneous heterotrophic denitrification during sulfur-utilizing autotrophic denitrification [J]. *Water Science & Technology*, 2000, **42**(3-4): 233-238.

- [8] Oh S E, Bum M S, Yoo Y B, *et al.* Nitrate removal by simultaneous sulfur utilizing autotrophic and heterotrophic denitrification under different organics and alkalinity conditions: batch experiments[J]. *Water Science & Technology*, 2003, **47** (1): 237-244.
- [9] Koenig A, Liu L H. Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors[J]. *Water Research*, 2001, **35** (8): 1969-1978.
- [10] Steudel R, Holdt G. Solubilization of elemental sulfur in water by cationic and anionic surfactants [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 1988, **27**(10): 1358-1359.
- [11] 刘续, 周伟丽, 董晓静, 等. 水力负荷对微污染水自养反硝化的影响[J]. *中国给水排水*, 2015, **31**(5): 45-49.
- [12] 王晖, 周伟丽, 欧阳丽华, 等. 硫自养反硝化结合生物活性炭处理硝酸盐废水[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(9): 29-32.
- [13] 李璟, 蒋进元, 王海燕, 等. 硫/沸石固定床去除硝酸盐工艺研究[J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(1): 38-41.
- [14] 李天听, 邱诚翔, 徐昊, 等. 硫/石灰石自养反硝化处理低碳高氮城市污水的工艺[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(3): 1062-1066.
- [15] Sahinkaya E, Dursun N, Kilic A, *et al.* Simultaneous heterotrophic and sulfur-oxidizing autotrophic denitrification process for drinking water treatment; control of sulfate production [J]. *Water Research*, 2011, **45**(20): 6661-6667.
- [16] Sahinkaya E, Yurtsever A, Aktaş Ö, *et al.* Sulfur-based autotrophic denitrification of drinking water using a membrane bioreactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **268**: 180-186.
- [17] 欧阳丽华, 周伟丽, 张振家, 等. 包埋固定化微生物的硫自养反硝化实验研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1644-1652.
- [18] 袁玉玲, 李睿华. 硫磺/石灰石自养反硝化系统脱氮除磷性能研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2041-2046.
- [19] Batchelor B, Lawrence A W. A kinetic model for autotrophic denitrification using elemental sulfur [J]. *Water Research*, 1978, **12**(12): 1075-1084.
- [20] Koenig A, Liu L H. Autotrophic denitrification of landfill leachate using elemental sulphur [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(5-6): 469-476.
- [21] Sahinkaya E, Kilic A. Heterotrophic and elemental-sulfur-based autotrophic denitrification processes for simultaneous nitrate and Cr(VI) reduction[J]. *Water Research*, 2014, **50**: 278-286.
- [22] Christianson L, Summerfelt S. Fluidization velocity assessment of commercially available sulfur particles for use in autotrophic denitrification biofilters [J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, **60**: 1-5.
- [23] Sholeh, Lefroy R D B, Blair G J. Effect of nutrients and elemental sulfur particle size on elemental sulfur oxidation and the growth of *Thiobacillus thiooxidans* [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1997, **48**(4): 497-502.
- [24] Koenig A, Liu L H. Use of limestone for pH control in autotrophic denitrification; continuous flow experiments in pilot-scale packed bed reactors[J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**(2): 161-171.
- [25] Christianson L, Lepine C, Tsukudaa S, *et al.* Nitrate removal effectiveness of fluidized sulfur-based autotrophic denitrification biofilters for recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, **68**: 10-18.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行