

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

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

2006~2015年北京市不同地区 O₃ 浓度变化 王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何镓祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)

电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)

广西玉林市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征 张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)

大气环境分区管理: 以广东省为例 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例 温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁潇蕾, 苗松 (57)

基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ¹⁵N 和 δ¹⁸O 模拟 王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价 张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响 王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌, 肖 (109)

以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险 姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响 卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)

K₂S₂O₈ 强化 g-C₃N₄ 薄膜光电催化降解 Cu(CN)₂ 并同步回收 Cu 党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)

以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)

氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能 马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除 曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响 任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征 赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响 许雯佳, 戚小英 (202)

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)

AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟 曹特特, 王林, 李咏梅 (219)

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)

碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)

容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)

DNBF-O₃-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响 周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)

高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用 韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)

去除城市生活污水中有机络合态金属强化其厌氧生物制气 卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价 王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH₄ 和 N₂O 通量日变化特征 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)

3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)

有机替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N₂O 排放的影响 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³C-CO₂ 脉冲标记 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)

基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测 曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响 封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)

典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征 张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响 代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响 王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较 张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈焯, 付璐璐, 王勋功 (438)

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系 袁丽娟, 廖且根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征 张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响 章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

DNBF-O₃-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物

钟丽燕^{1,2}, 郝瑞霞^{1*}, 王卫东¹, 万京京¹, 朱晓霞¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 惠州市华禹水利水电工程勘测设计有限公司, 惠州 516003)

摘要: 为提高污水厂尾水水质, 本研究采用新型缓释碳源复配海绵铁、活性炭作为反硝化生物滤池的复合填料, 分别以模拟二级处理出水和实际污水厂尾水为进水, 考察了复合缓释碳源填料反硝化生物滤池-臭氧-活性炭 (DNBF-O₃-GAC) 组合工艺同步脱氮除磷及去除微生物代谢产物的性能, 并借助 MiSeq 高通量测序技术分析了反硝化生物滤池生物膜中的微生物群落结构特征。结果表明, 组合工艺取得了较好的脱氮除磷及微生物代谢产物的效果: 模拟配水阶段和实际尾水阶段 NO₃⁻-N 平均去除率分别达到 88.87%、79.99%; TP 平均去除率分别达到 87.67%、65.51%; UV₂₅₄ 平均去除率分别达到 45.51%、49.23%。组合工艺各处理单元具有不同的功能: NO₃⁻-N、TN、TP、TFe 的变化主要发生在反硝化生物滤池反应器中; UV₂₅₄、三维荧光强度的变化主要发生在臭氧-活性炭反应器中。微生物在属水平进行聚类分析结果表明, 反硝化脱氮系统存在硫自养反硝化菌和异养反硝化菌, 当实际尾水阶段碳源相对不足时, 硫自养反硝化作用有了显著加强, *Thiobacillus* (硫杆菌属) 的占比由 7.44% 上升至 29.62%, 硫自养反硝化与异养反硝化形成的这种互补作用延长了新型缓释碳源的使用周期。

关键词: 污水厂尾水; 复合缓释碳源填料; 同步脱氮除磷; 微生物代谢产物; MiSeq 高通量测序技术

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0247-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201706070

Combined Process of DNBF-O₃-GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal

ZHONG Li-yan^{1,2}, HAO Rui-xia^{1*}, WANG Wei-dong¹, WAN Jing-jing¹, ZHU Xiao-xia¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, College of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Huizhou City Huayu Water Resources and Hydropower Engineering Survey and Design Co., Ltd., Huizhou 516003, China)

Abstract: To improve the quality of the tailings water from a wastewater treatment plant (WWTP), a denitrification biofilter (DNBF) with a composite filler composed of a new slow-release organic-carbon source (SOC-F), sponge iron, and activated carbon was tested. Studies were conducted in the combined process of DNBF-O₃-GAC to explore the efficiency of the advanced removal of nitrogen, phosphorus, and microbial metabolite by using synthetic effluent made from running water and chemicals. Corresponding comparative studies were conducted by using the secondary effluent from the WWTP. The microbial population structure in the biofilm of the denitrification biofilter was analyzed by adopting MiSeq high-throughput sequencing technologies. The results indicated that the combination process achieved high efficiency removal of nitrogen, phosphorus, and microbial metabolite. The average removal rate of NO₃⁻-N in the simulated and actual water period reached 88.87% and 79.99%, respectively; the average removal rate of TP reached 87.67% and 65.51%, respectively; and the average removal rate of UV₂₅₄ reached 45.51% and 49.23%, respectively. Each processing unit had different functions. The changes in NO₃⁻-N, TN, TP, and TFe mainly occurred in the denitrification biofilter, and the removal of UV₂₅₄ and the change in the three-dimensional fluorescence intensity mainly occurred in the ozone-activated carbon reactor. The cluster analysis at the genus level indicated that the denitrification system had sulfur autotrophic denitrifying bacteria and heterotrophic denitrifying bacteria. Sulfur autotrophic denitrification increased obviously in the actual water period when relatively lack of carbon sources, and the proportion of *Thiobacillus* increased from 7.44% to 29.62%. The complementary effect of sulfur autotrophic denitrification and heterotrophic denitrification had extended the use of the new slow-release carbon source.

Key words: effluent; carbon filter; simultaneous removal of nitrogen and phosphorus; microbial metabolite; high-throughput sequencing technologies

受当前污水处理技术的限制, 城镇生活污水经二级生物处理后仍含有一定浓度的氮、磷和残留有机物(主要是微生物代谢产物), 当回用于水体时会带来安全隐患^[1-3]。因此, 针对污水厂尾水水质特性, 开发简便有效的同步脱氮除磷及去除微生物代谢产物的深度处理工艺已成为亟待解决的问题。

污水厂尾水的 C/N 值普遍偏低, 目前主要以生物法脱氮为主, 包括异养反硝化脱氮和自养反硝化

收稿日期: 2017-06-08; 修订日期: 2017-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378028)

作者简介: 钟丽燕(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与资源化利用, E-mail: xiaozhongliyan@163.com

* 通信作者, E-mail: haorui-xia@bjut.edu.cn

脱氮. 生物脱氮时存在碳源不足的问题, 有研究表明同时发生异养反硝化作用和硫自养反硝化作用的混养条件下^[4-7], 可以提高硝态氮的去除率和减少有机碳源的使用量. 当外加液体碳源时投加量不易调控, 基于这种弊端, 张兰河等^[8]采用“固相反硝化”工艺能够避免连续投加碳源问题, 同时也简化了操作过程. 王润众^[9]将自制的含有淀粉、PVA、硫磺粉的固相新型缓释碳源(SOC-F)用作反硝化生物滤池的填料并进行了再生水的脱氮研究, 硝态氮去除率可达 100%, 该工艺在无需额外添加碳源的情况下取得了较好的脱氮效果, 但存在填料堵塞的问题及不具有高效除磷的功能.

再生水的深度除磷中, 单纯的生物除磷很难使出水达标排放^[10], 常需要结合化学法来强化除磷的效果, 海绵铁因其高效的除磷能力而受到国内外研究者的重视. 相关研究表明^[11-13], 铁腐蚀所产生的 Fe^{2+} 和进一步氧化生成的 Fe^{3+} 以及它们的水化物, 通过沉淀、絮凝、吸附和卷扫等作用可以大幅度降低污水中的氮、磷.

目前国内外研究较多的是以活性炭吸附、臭氧氧化和膜工艺等来提高对微生物代谢产物的去除作用^[14]. 膜处理工艺虽然是一种相对高效的污染去除工艺, 但是目前膜处理工艺的成本较高, 膜污染问题也限制了该方法的普及应用.

本研究采用王润众研制的 SOC-F 并复配海绵铁、活性炭作为反硝化生物滤池的复合填料, 以模拟配水和实际尾水为进水, 探究复合缓释碳源填料反硝化生物滤池-臭氧-活性炭组合工艺对再生水中氮、磷及微生物代谢产物的去除性能, 并运用 MiSeq 高通量测序技术分析反硝化生物滤池生物膜中的微生物群落结构.

1 材料与方法

1.1 实验装置

反硝化生物滤池-臭氧-活性炭(DNBF- O_3 -GAC)组合工艺实验装置如图 1 所示, 分为前后两段: 前段是反硝化生物滤池反应器, 后段是臭氧-活性炭反应器.

反硝化生物滤池反应器如图 2 所示, 有效容积为 6.4 L, 采用上向流. 反应器为圆柱形有机玻璃材质, 内径为 10 cm, 高度为 1.5 m, 分为上下两段: 下段高为 1 m, 分为承托层和填料层, 高度分别为 0.1 m、0.9 m, 填料层填充由 SOC-F(制备工艺流程参见文献[15])、活性炭与海绵铁组成的复合填料, 三者体积比为 1.8:2:1, 并用尼龙网进行球形包裹, 以

期改善填料的堵塞问题, 下段的主要作用是释碳和反硝化脱氮除磷; 上段高为 0.5 m, 填充了 0.35 m 的火山岩填料, 主要目的是延长反硝化进程.

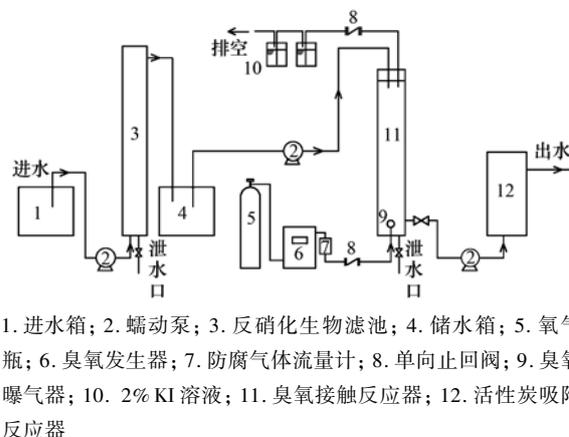


图 1 DNBF- O_3 -GAC 组合工艺实验装置示意

Fig. 1 Experimental device for the combined process of DNBF- O_3 -GAC

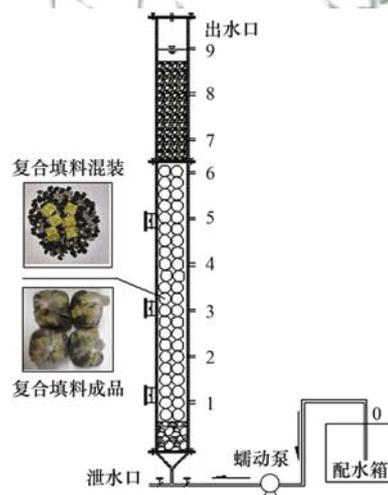


图 2 反硝化生物滤池实验装置示意

Fig. 2 Experimental device for the denitrification biofilter

臭氧接触反应器是一个有效容积为 2.6 L 的有机玻璃圆柱状容器, 高度为 1 650 mm, 内径为 50 mm, 高径比为 33, 以有利于臭氧在反应柱中进行传质和充分反应. 采用 3S-A3 型臭氧发生器(北京同林科技有限公司), 以纯氧为气源, 由防腐气体流量计来控制气体流量, 臭氧浓度的测定采用碘量法. 臭氧发生器制备的含有臭氧的混合气体经臭氧曝气器均匀布气, 气体从下部进入并与上部进入的反硝化生物滤池出水进行充分接触反应. 最终臭氧尾气由 2% 的 KI 溶液进行吸收处理.

活性炭反应器是一个内径为 25 cm, 高度为 0.6 m 的圆柱形有机玻璃体, 有效容积为 9.75 L, 采用的是粒径 3~5 mm 的颗粒活性炭, 活性炭反应器的

HRT 定为 15 min.

1.2 实验水质

分别采用模拟二级处理出水和实际污水厂尾水为实验用水. 其中, 模拟二级处理出水是在自来水

中加入一定量的 KNO₃、KH₂PO₄、(NH₄)₂SO₄ 和富里酸配置成一定浓度的水样. 实际污水厂尾水取自于北京某污水处理厂的二级生物处理出水. 两种实验用水水质情况见表 1.

表 1 模拟配水和实际尾水的水质情况

Table 1 Quality of the simulated and actual water

实验水质	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	pH	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹
模拟配水	28~31	0	8.0~8.4	36~39	15~26	1.4~1.5	7.0~8.1	0.102~0.108
实际尾水	20~24	0	0.3~0.5	23~26	18~29	0.06~0.12	7.5~8.1	0.125~0.140

1.3 实验方法与分析指标

按照接种、挂膜顺序启动反硝化生物滤池反应器, 接种污泥来自北京某污水处理厂回流污泥, 具体反应器启动方法参照文献[16]. 当各污染指标稳定后, 挂膜启动成功. 分别在不同 HRT 和进水硝态氮浓度条件下进行梯度实验, 检测项目包括进出水 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、TN、SO₄²⁻、TP、TFe、COD 浓度和 pH 值, 各梯度至少有 15 d 以上的稳定运行数据.

首先分别确定出反硝化生物滤池脱氮除磷的 HRT、臭氧接触反应器的臭氧投加量; 然后在组合工艺最佳工况条件下, 以模拟配水和实际尾水为进水, 考察组合工艺同步脱氮除磷及微生物代谢产物的效果; 最后在反硝化生物滤池最佳运行条件下, 分别在模拟配水和实际尾水阶段采集生物膜样本(编号分别为 A1、A2), 移交给北京美吉生物公司进行 MiSeq 高通量测序.

主要分析指标和所用仪器及方法见表 2.

表 2 分析项目与检测方法

Table 2 Analytical devices and method

分析项目	所用仪器	检测方法
NO ₃ ⁻ -N/NO ₂ ⁻ -N/SO ₄ ²⁻	Metrohm 861 离子色谱仪(瑞士万通)	离子色谱法
NH ₄ ⁺ -N	UVmini-1240 紫外可见分光光度计(日本岛津)	纳氏试剂分光光度法
TN	Jena multi N/C 3100(德国耶拿)	TOC/TN 分析仪器法
TP/TFe	722 可见分光光度计(上海欣茂)	分光光度计法
COD	COD 快速测定仪(连华科技)	快速消解分光光度法
pH	PHS-3C pH 计(上海三信)	玻璃电极法
UV ₂₅₄	UVmini-1240 紫外可见分光光度计(日本岛津)	紫外分光光度法
腐殖质类有机物	CARY Eclipse 荧光分光光度计(美国瓦里安)	三维荧光光谱法

2 结果与讨论

2.1 组合工艺运行参数的确定

2.1.1 反硝化生物滤池 HRT 的确定

HRT 对反硝化生物滤池脱氮除磷效果的影响如图 3 所示.

由图 3(a)可知, 反应器以 HRT = 6 h 启动运行, 进水硝态氮浓度在 35 mg·L⁻¹ 左右, 到第 9 d 时, 总氮去除率已上升至 100%, 反应器迅速启动成功. HRT = 6 h 时, 总氮平均去除率可达到 97.5%, 但出水 COD 浓度偏高. 缩短 HRT 为 3 h 运行, 出水 COD 平均浓度下降为 29.1 mg·L⁻¹, 但总氮去除率也下降到 60% 左右. 逐渐延长 HRT 至 4 h, 出水 COD 平均浓度基本稳定 27 mg·L⁻¹ 左右, 总氮平均去除率恢复到 94.2%. 因此, 从总氮去除率和出水 COD 浓

度两方面综合考虑, 反硝化生物滤池 HRT 定为 4 h.

由图 3(b)可知, 反应器启动成功后一直保持较高的除磷效率, 且随着 HRT 的延长, TP 平均去除率整体呈现上升趋势; 当 HRT 增至 4 h 时, TP 平均去除效率可高达 95.92%. 系统稳定运行后进出水 TFe 增量稳定在 0.2~2.5 mg·L⁻¹ 范围内, 表明系统中海绵铁能持续腐蚀产生铁离子, 有研究表明, 生物海绵铁处理生活污水时, 依靠海绵铁自身溶出的铁离子(包括 Fe²⁺ 和 Fe³⁺)对磷的絮凝沉淀作用, 可以达到持续稳定的除磷效果^[12]. 复合填料作为反硝化滤池生物载体时具有稳定体系 pH 值的能力, 出水 pH 值稳定且趋于中性.

2.1.2 臭氧投加量的确定

控制臭氧投加量分别为 0、2、3、4、5、6、8、10 mg·L⁻¹, 考察不同臭氧投加量时反应器内 UV₂₅₄

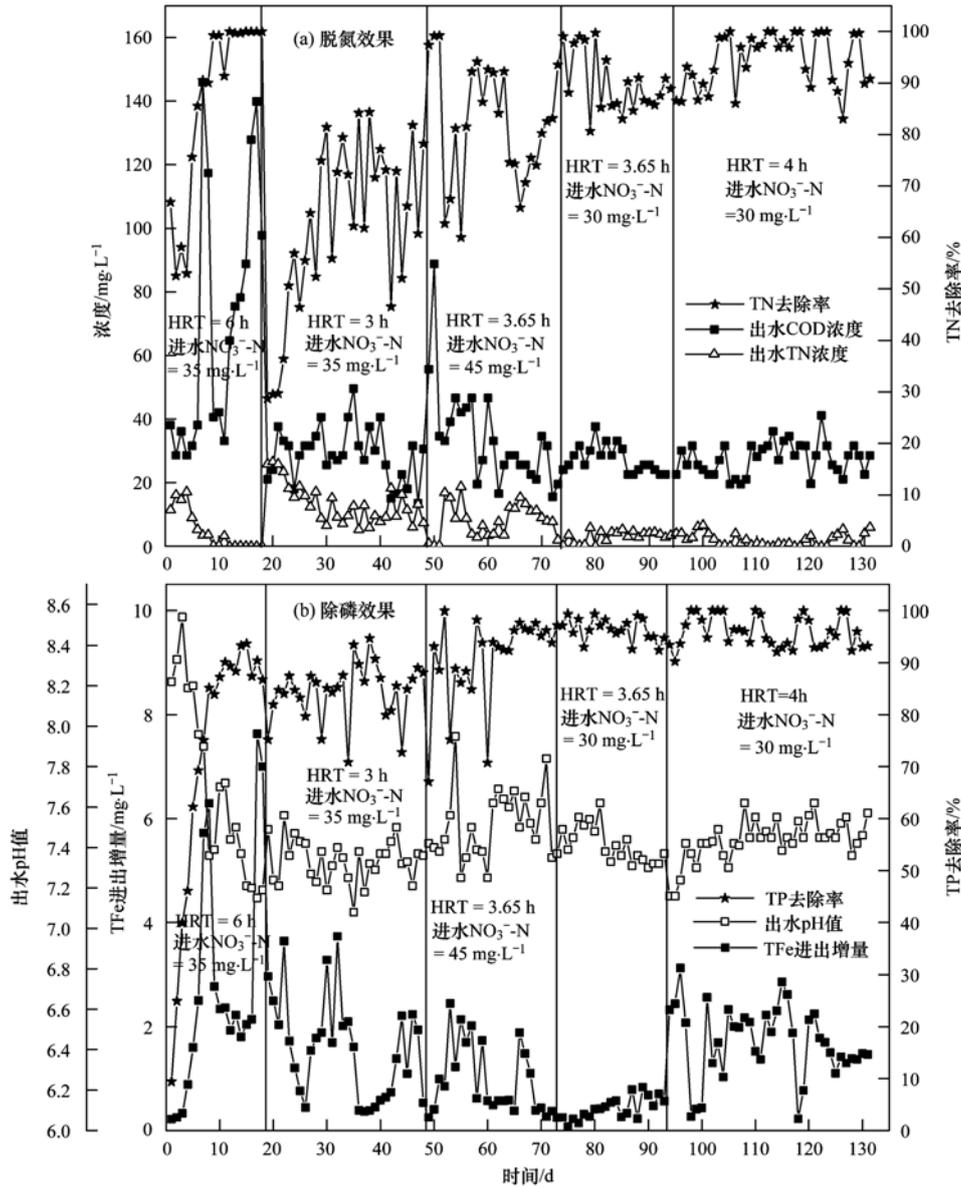


图 3 反硝化生物滤池脱氮除磷效果

Fig. 3 Effect of nitrogen and phosphorus removal in the denitrification biofilter

的处理效果(结果见图4).

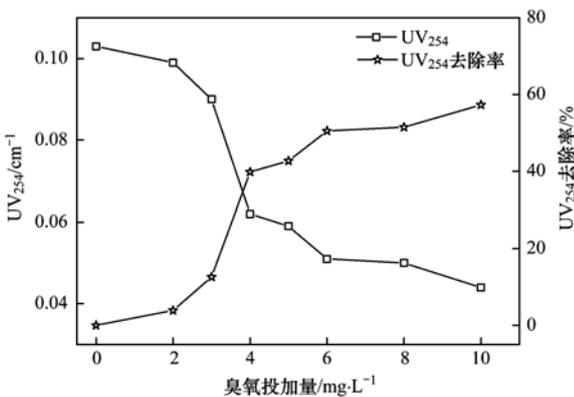


图 4 不同臭氧投加量对 UV₂₅₄ 的处理效果

Fig. 4 Treatment efficiency of different ozone dosages on UV₂₅₄ removal

由图 4 可知,随着臭氧投加量的增加,UV₂₅₄ 呈现出明显的下降趋势. 当臭氧投加量为 6 mg·L⁻¹ 时,UV₂₅₄ 的去除率为 50.49%,继续加大臭氧投加量 UV₂₅₄ 的去除效果增加不显著,因此,臭氧接触反应器选用臭氧投加量 6 mg·L⁻¹ 来处理反硝化生物滤池出水.

2.2 组合工艺同步脱氮除磷及微生物代谢产物的运行效果

分别考察了组合工艺处理模拟配水和实际尾水同步脱氮除磷及微生物代谢产物的运行效果,并分析了组合工艺沿程各单元进出水(如图5)水质变化情况.

模拟配水和实际尾水阶段沿程水质的变化情况如图6所示.

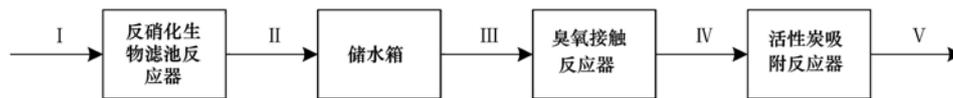
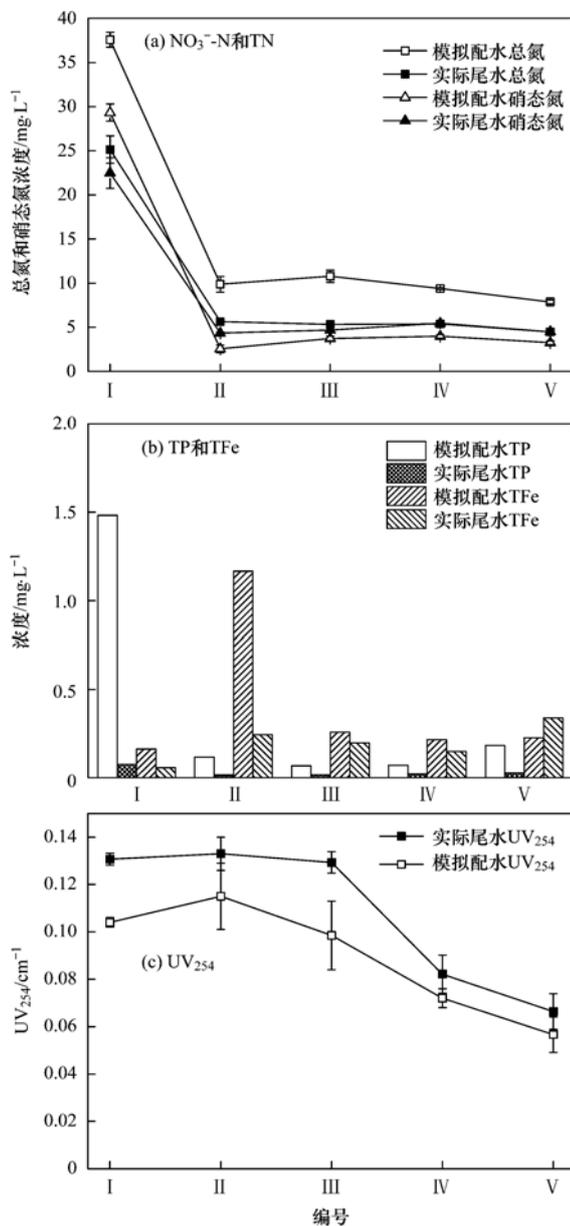
图 5 DNBF-O₃-GAC 组合工艺沿程采样点Fig. 5 Sampling points in the combined process of DNBF-O₃-GAC along the process path

图 6 沿程水质变化情况

Fig. 6 Variation of water quality along the process path

由图 6(a) 可知, 模拟配水和实际尾水阶段时组合工艺对 NO₃⁻-N 的平均去除率分别达到 88.87%、79.99%, 出水 NO₃⁻-N 平均浓度分别为 3.27 mg·L⁻¹、4.50 mg·L⁻¹; 组合工艺对 TN 的平均去除率分别达到 79.03%、82.17%, 出水 TN 平均浓度分别为 7.88 mg·L⁻¹、4.48 mg·L⁻¹. 模拟配水阶段 NO₃⁻-N 的去除效果强于实际尾水阶段,

这可能跟实际尾水水质的复杂性、不稳定性等特点有关.

由图 6(b) 可知, 当进水分别为模拟配水、实际尾水时, 组合工艺对 TP 的平均去除率分别达到 87.67%、65.51%, 出水 TP 平均浓度分别为 0.183 mg·L⁻¹、0.026 mg·L⁻¹. 其中, 反硝化生物滤池 TP 平均去除率分别为 92.12%、79.00%, 出水 TFe 平均浓度分别为 1.166 mg·L⁻¹、0.244 mg·L⁻¹. 总磷的去除与出水总铁含量有一定的关系, 与反硝化生物滤池中海绵铁填料腐蚀有关, 随着反硝化生物滤池的运行, 海绵铁逐渐腐蚀钝化, 到实际尾水阶段时除磷效率有所下降.

由图 6(c) 可知, 模拟配水和实际尾水阶段时组合工艺对 UV₂₅₄ 的平均去除率分别达到 45.51%、49.23%, 两阶段水样经反硝化生物滤池反应器后 UV₂₅₄ 均有一定的增长, 臭氧接触反应器对 UV₂₅₄ 的平均去除率分别可达到 30.77%、37.12%.

郝瑞霞等^[17] 利用三维荧光光谱法研究得出特征荧光团中心最大荧光强度——特征荧光强度 (E_x/E_m) 可以用于表征污水中溶解性有机物的含量^[18], 本研究通过三维荧光光谱法来表征以腐殖质类有机物为主要的微生物代谢产物. 沿程三维荧光光谱图谱的变化情况如图 7 所示.

通过进一步分析组合工艺各单元进出水三维荧光光谱的数据矩阵, 得到沿程荧光强度 (FI) 的变化情况如图 8 所示.

由图 7 可知, 模拟配水阶段时主要荧光峰有 A、B 和 C, 实际尾水阶段时主要荧光峰有 A 和 B, A 和 B 分别表示富里酸、腐殖酸等腐殖质, C 表示芳香族蛋白质或酚类物质. 由图 8 可知, 模拟配水阶段组合工艺 A、B 和 C 的荧光强度 (FI) 分别下降了 78.9%、71.9%、88.3%; 实际尾水阶段组合工艺 A 和 B 的 FI 分别下降了 79.89%、80.45%. 臭氧对荧光类物质的氧化作用明显, 从而可使该类物质的荧光峰显著降低^[19,20], 水样经 6 mg·L⁻¹ 臭氧氧化后, 模拟配水阶段 A、B 和 C 的 FI 分别下降了 80.02%、79.01%、93.95%; 实际尾水阶段 A 和 B 的 FI 分别下降了 65.90%、63.51%.

因此, 无论是处理模拟配水还是实际尾水, 组合

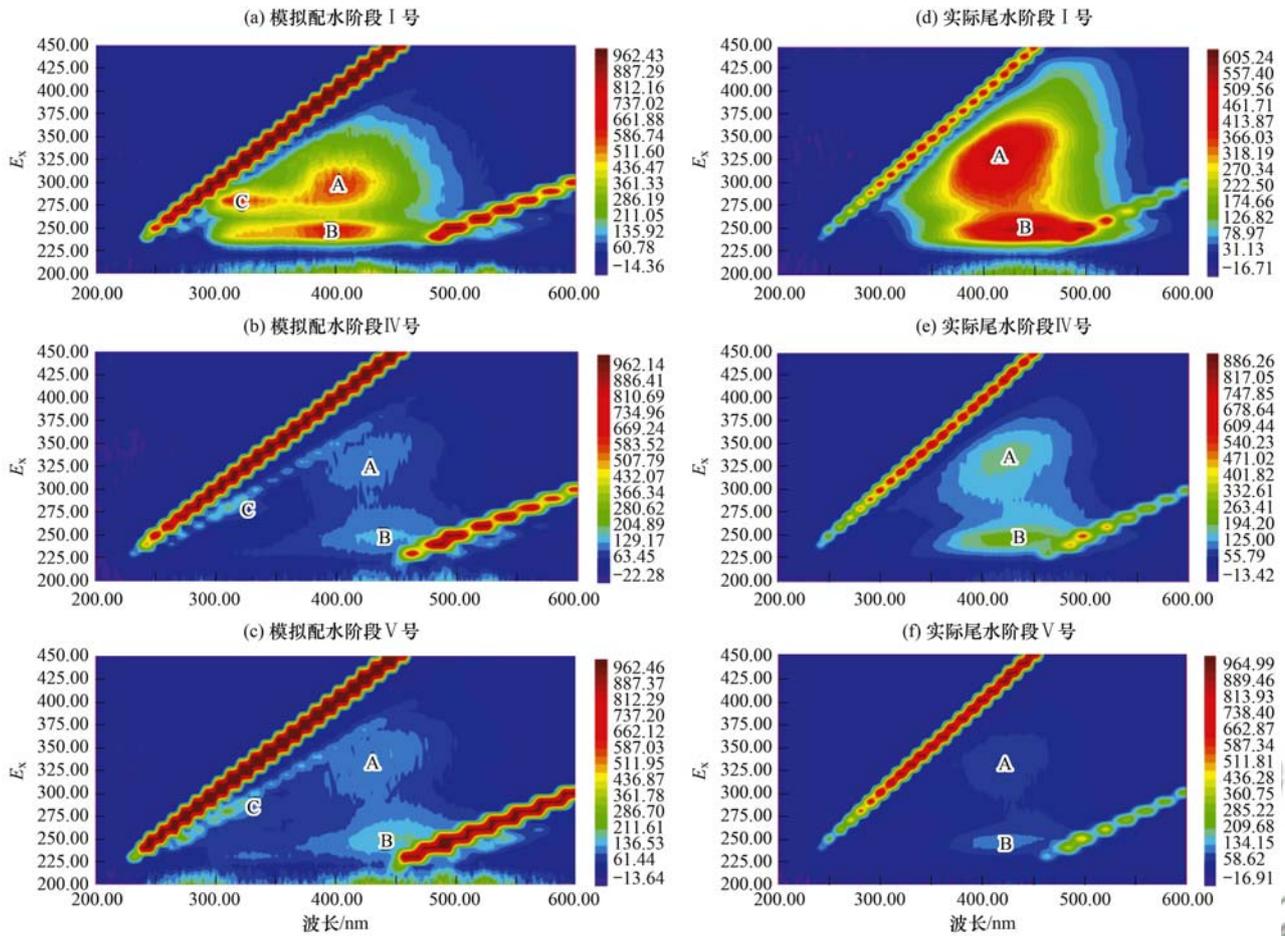


图 7 沿程三维荧光光谱图谱的变化情况

Fig. 7 Change in three-dimensional fluorescence pattern along the process path

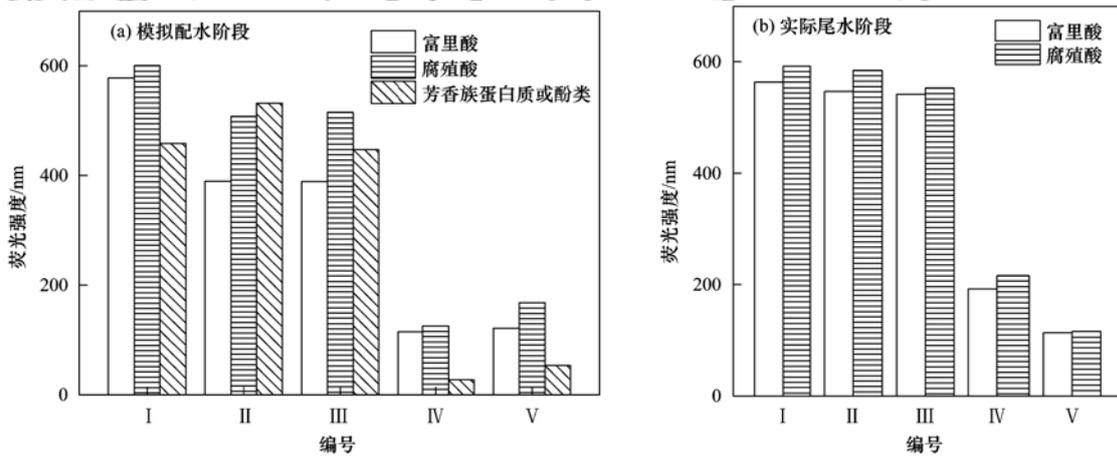


图 8 沿程荧光强度的变化情况

Fig. 8 Change of fluorescence intensity along the process path

工艺均取得较好的同步脱氮除磷及去除尾水中的残余有机物(主要是微生物代谢产物)的效果. 其中, TN、TP 主要是在反硝化生物滤池中被去除, 去除比例分别为 93%、94%; UV₂₅₄、三维荧光强度的变化主要发生在臭氧-活性炭反应器中, 去除比例分别为 80% 以上和 85% 以上.

2.3 系统中微生物菌群结构分析

2.3.1 微生物多样性分析

常用 Shannon-Wiener 指数反映群落种类丰富度, 样本 A1 和 A2 的 Shannon 值分别为 4.04、3.59, 表明模拟配水阶段的生物多样性比实际尾水阶段的生物多样性更丰富. 运用 MiSeq 高通量测序技术,

样本 A1 和 A2 分别获得了 33 405、30 086 条优化序列。对优化后的序列进行 OTU 聚类, 聚类过程中去除嵌合体后得到 OTU 代表序列, 在 97% 的相似性下样本 A1 和 A2 分别获得了 190、192 个 OTUs。

2.3.2 菌群结构特征分析

为了得到具体的微生物群落组成, 将得到的 OTU 代表序列与 Silva 库进行比对, 结合分类学分析方法, 作样本群落结构分析图(如图 9), 并将样本 A1、A2 中主要菌属的功能及其丰度列于表 3 中。

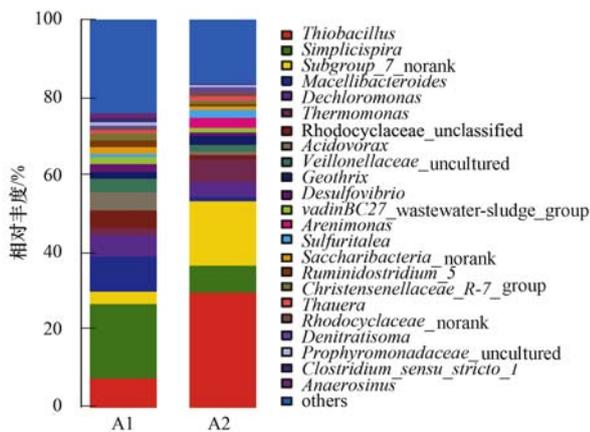


图 9 样本群落结构分析(分类到属)

Fig. 9 Bacterial communities at the genera level in the sample

由图 9 和表 3 可知, 反硝化脱氮系统存在硫自养反硝化菌和异养反硝化菌, 模拟配水阶段样本 A1 中发现了 *Thiobacillus*、*Simplicispira*、*Dechloromonas*、

Acidovorax、*Anaerosinus* 等与反硝化有关的菌属, 这类菌属占已知微生物菌属的 38.06%, 其中硫自养反硝化菌和异养反硝化菌所占的比例分别为 7.44% 和 25.95%, 以异养反硝化作用为主; 实际尾水阶段样本 A2 中发现了 *Thiobacillus*、*Simplicispira*、*Dechloromonas*、*Sulfuritalea*、*Thauera* 等与反硝化有关的菌属^[21,22], 这类菌属占已知微生物菌属的 43.75%, 其中硫自养反硝化菌和异养反硝化菌所占的比例分别为 31.53% 和 12.22%, 以硫自养反硝化作用为主。

两阶段样本中差别比较明显的是 *Thiobacillus* 和 *Simplicispira* 的量, 其中 *Thiobacillus* 是一种硫自养反硝化菌, 该菌在厌氧条件下, 通常以单质硫或硫化物为电子供体、以硝酸盐为电子受体来完成反硝化脱氮过程^[23]。当实际尾水阶段碳源相对不足时, 会刺激生物膜上 *Thiobacillus* 的大量生长, *Thiobacillus* 的占比由 7.44% 上升至 29.62%, 系统硫自养反硝化作用在实际尾水阶段有了显著加强, 硫自养反硝化与异养反硝化形成的这种互补作用延长了新型缓释碳源的使用周期。

反硝化系统存在一定的生物除磷作用, 除磷菌包括 *Rhodocyclaceae_unclassified* 和 *Thermomonas*^[24,25], 在模拟配水和实际尾水阶段的占比仅为 6.3%、6.92%。因此组合工艺主要以海绵铁腐蚀除磷为主, 生物除磷所占的比例很小。

表 3 样本中主要菌属的功能及其丰度

Table 3 Function and abundance of the main genus in the sample

菌属	功能	菌属(科)丰度/%	
		A1	A2
<i>Thiobacillus</i> (硫杆菌属)	硫自养反硝化	7.44	29.62
<i>Simplicispira</i>	利用乙酸进行异养反硝化	19.22	7.21
<i>Macellibacteroides</i> (拟杆菌属)	水解酸化有机物	9.21	1.12
<i>Subgroup_7_norank</i>		3.26	16.56
<i>Dechloromonas</i>	异养反硝化	5.5	3.77
<i>Acidovorax</i> (食酸菌属)	异养或氢自养反硝化, 能分泌胞外 PHB 解聚酶, 使 PHB 和 PHBV 降解	4.67	0
<i>Anaerosinus</i>	异养反硝化	1.23	0
<i>Sulfuritalea</i>	自养菌, 以硫代硫酸盐、硫、氢等为电子供体, 硝酸盐为电子受体	0	1.91
<i>Thauera</i> (陶厄氏菌属)	能利用乙酸、乙醇和乙酸苯酯等小分子有机物进行异养反硝化	0	1.24
<i>Rhodocyclaceae_unclassified</i> (红环菌科)	异养或氢自养反硝化, 聚磷功能	4.47	1.17
<i>Thermomonas</i> (热单胞菌属)	聚磷菌, 具有聚磷功能	1.83	5.75

3 结论

(1) 组合工艺运行参数如下: 反硝化生物滤池反应器 HRT 定为 4 h, TN 和 TP 的平均去除率可分别达到 94.2%、95.92%; 臭氧投加量定为 6 mg·L⁻¹; 活性炭反应器 HRT 定为 15 min。

(2) 组合工艺取得了较好的脱氮除磷及微生物代谢产物的效果: 模拟配水阶段和实际尾水阶段 NO₃⁻-N 平均去除率分别达到 88.87%、79.99%; TP 平均去除率分别达到 87.67%、65.51%; UV₂₅₄ 平均去除率分别可达到 45.51%、49.23%; 模拟配水阶段时 A、B 和 C 的 FI 分别下降了 78.9%、71.9%、

88.3%,实际尾水阶段时 A 和 B 的 FI 分别下降了 79.89%、80.45%。组合工艺各处理单元具有不同的功能: NO_3^- -N、TN、TP、TFe 的变化主要是发生在反硝化生物滤池反应器中; UV_{254} 、三维荧光强度的变化主要发生在臭氧-活性炭反应器中。

(3)反硝化脱氮系统存在硫自养反硝化菌和异养反硝化菌。当实际尾水阶段碳源相对不足时,硫自养反硝化作用有了显著加强,*Thiobacillus* 的占比由 7.44% 上升至 29.62%,硫自养反硝化与异养反硝化形成的这种互补作用延长了新型缓释碳源的使用周期。反硝化系统存在生物除磷作用,组合工艺主要以海绵铁腐蚀除磷为主,生物除磷所占的比例很小。

参考文献:

- [1] 李燕群,何通国,刘刚,等. 城市再生水回用现状及利用前景[J]. 资源开发与市场, 2011, 27(12): 1096-1100.
Li Y Q, He T G, Liu G, et al. Current situation and prospect of reclaimed municipal wastewater utilization [J]. Resource Development & Market, 2011, 27(12): 1096-1100.
- [2] 曲久辉,王凯军,王洪臣,等. 建设面向未来的中国污水处理概念厂[N]. 中国环境报, 2014-01-07(010).
- [3] Schaum C, Lensch D, Cornel P. Water reuse and reclamation; a contribution to energy efficiency in the water cycle[J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2015, 5(2): 83-94.
- [4] Lawrence A W, Bisngni J J, Batchelor B, et al. Autotrophic denitrification using sulfur electron donors [R]. Washington: EPA, 1978. 78-113.
- [5] Christianson L, Lepine C, Tsukuda S, et al. Nitrate removal effectiveness of fluidized sulfur-based autotrophic denitrification biofilters for recirculating aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2015, 68: 10-18.
- [6] 徐忠强,郝瑞霞,徐鹏程,等. 硫铁填料和微电流强化再生水脱氮除磷的研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 406-413.
Xu Z Q, Hao R X, Xu P C, et al. Research on enhanced denitrification and phosphorus removal from reclaimed water by using sponge iron/sulfur composite fillers and low electrical current[J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 406-413.
- [7] 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.
- [8] 张兰河,左正艳,王旭明. 固相反硝化系统中微生物群落结构的研究进展[J]. 生物技术通报, 2015, 31(1): 39-45.
Zhang L H, Zuo Z Y, Wang X M. Research progress on microbial community structure in solid-phase denitrification systems[J]. Biotechnology Bulletin, 2015, 31(1): 39-45.
- [9] 王润众. 新型缓释碳源滤料的制备及其应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015. 31-40.
- [10] 侯红勋,王淑莹,王亚宜,等. A^2/O 型氧化沟的旁侧化学除磷试验研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(7): 30-33.
Hou H X, Wang S Y, Wang Y Y, et al. Study on chemical phosphorus removal based on A^2/O oxidation ditch[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(7): 30-33.
- [11] 匡颖,董启荣,王鹤立. 海绵铁与火山岩填料 A/O 生物滴滤池脱氮除磷的中试研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(9): 50-53.
Kuang Y, Dong Q R, Wang H L. Pilot scale experiment on denitrification and phosphorus removal in A/O trickling filter with volcanic fillings[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(9): 50-53.
- [12] 李杰,王亚娥,王志盈,等. 生物海绵铁在生活污水脱氮除磷中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(1): 97-100.
Li J, Wang Y E, Wang Z Y, et al. Study on application of biological sponge iron in nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(1): 97-100.
- [13] 刘俊新,李杰,王亚娥. 铁细菌在污水除磷中的应用研究[J]. 环境科技, 2012, 25(6): 61-65.
Liu J X, Li J, Wang Y E. Study on application of iron bacteria in phosphorus removal from wastewater [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(6): 61-65.
- [14] 吕娟,张道方. 臭氧技术在污水处理中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 123-126.
Lü J, Zhang D F. Application of ozone technology in wastewater treatment[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(6): 123-126.
- [15] 王润众,郝瑞霞,赵文莉. 醋酸酯淀粉和 SPAN80 在反硝化缓释碳源中的应用[J]. 中国给水排水, 2015, 31(7): 13-17.
Wang R Z, Hao R X, Zhao W L. Application of SPAN80 and starch acetate in slow-release carbon source for denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(7): 13-17.
- [16] 李素梅,郝瑞霞,孟成成. 三维电极生物膜反应器低温启动试验研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(5): 101-105.
Li S M, Hao R X, Meng C C. Start-up of three-dimensional electrode biofilm reactor at low temperature[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(5): 101-105.
- [17] 郝瑞霞,曹可心,邓亦文. 城市污水处理过程中有机污染物三维荧光特性的变化规律[J]. 分析测试学报, 2007, 26(6): 789-792, 796.
Hao R X, Cao K X, Deng Y W. The variation trend of three-dimensional characteristic fluorescence of dissolved organic matter in the wastewater treatment process [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2007, 26(6): 789-792, 796.
- [18] Hao R X, Li S M, Li J B, et al. Denitrification of simulated municipal wastewater treatment plant effluent using a three-dimensional biofilm-electrode reactor; operating performance and bacterial community [J]. Bioresource Technology, 2013, 143: 178-186.
- [19] 杨岸明,常江,甘一萍,等. 臭氧氧化二级出水有机物可生化性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 363-367.
Yang A M, Chang J, Gan Y P, et al. Research on the organic biodegradability of secondary effluent treated by ozonation [J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 363-367.
- [20] 郑晓英,王俭龙,李鑫玮,等. 臭氧氧化深度处理二级处理出水的研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1159-1165.
Zheng X Y, Wang J L, Li X W, et al. Advanced treatment of

- secondary effluent by ozonation [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1159-1165.
- [21] 徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 等. PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3257-3263.
- Xu Y, Qiu T L, Han M L, *et al.* Analysis on microbial community in biofilm coating onto solid carbon source using the PCR-DGGE technique [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3257-3263.
- [22] 白婷婷. 低碳源污水硝化及固体碳源反硝化系统的微生物特性 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016. 12-20.
- [23] Wang H Y, Zhou Y X, Yuan Q, *et al.* Bacteria morphology and diversity of the combined autotrophic nitrification and sulfur-carbon three-dimensional-electrode denitrification process [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2014, **49**(1): 39-51.
- [24] 余鸿婷, 李敏. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷机制及其在废水处理中的应用 [J]. *微生物学报*, 2015, **55**(3): 264-272.
- Yu H T, Li M. Denitrifying and phosphorus accumulating mechanisms of denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs) for wastewater treatment [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2015, **55**(3): 264-272.
- [25] 翟思媛. 活性污泥异化 Fe(III) 还原协同除磷特性及影响因素研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014. 33-37.

《环境科学》连续 6 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2017 年 11 月 22 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2017 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》荣获“2017 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 6 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNBf-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)