

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用

周亚坤¹, 杨宏^{1*}, 王少伦¹, 何海超¹, 刘宗跃¹, 苏扬¹, 张辉²

(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. 北京城市排水集团有限公司, 北京 100022)

摘要: 利用包埋广谱性高效反硝化填料处理城市污水厂二级出水, 可有效降低出水总氮(TN)浓度, 本研究共分为两部分, D1阶段研究了包埋反硝化填料对污水厂二级出水的适应性、TN去除效果、稳定运行及填料反冲洗的工况条件; D2阶段研究了填料在中试条件下稳定运行1 a脱氮性能的变化, 并通过高通量测序和荧光定量分析(qPCR)手段, 研究对比了包埋填料运行前后微生物种群的变化规律。通过研究发现, 包埋反硝化填料在水温为(24±1)℃、pH为7.1、HRT为1 h和填充率为10%, 投加乙酸钠保证碳源充足的条件下稳定运行7 d, 即可适应二级出水水质, 实现出水总氮<5 mg·L⁻¹。通过对比研究不同水力停留时间(HRT)对填料TN去除效果的影响, 得出适宜的HRT为30 min, 填充率为10%的运行条件, 在7.2 m³·d⁻¹的进水条件下经过1 a的稳定运行, TN去除率最高可达到90.42%, 出水总氮可稳定在5 mg·L⁻¹以下。通过对比反冲洗效果, 确定了反冲洗强度为5.2 L·(m²·s)⁻¹, 周期为每3 d进行一次。高通量测序和荧光实时定量PCR分析结果表明, 运行前后填料上反硝化功能菌属的丰度及拷贝数都有了明显增长, 这说明细菌在包埋条件下可实现良好的自我生长。

关键词: 微生物固定化; 包埋反硝化填料; 深度脱氮; 反冲洗; 微生物群落结构

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0849-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201908053

Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application

ZHOU Ya-kun¹, YANG Hong^{1*}, WANG Shao-lun¹, HE Hai-chao¹, LIU Zong-yue¹, SU Yang¹, ZHANG Hui²

(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. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: The use of an embedded broad-spectrum high-efficiency denitrification filler to treat secondary effluent from municipal wastewater treatment plants can effectively reduce total nitrogen (TN) concentration of the effluent. This study consists of two parts. The D1 stage studies the adaptability of the secondary effluent based on the embedded denitrification, removal effect of total nitrogen, stable working conditions, and backwashing conditions; In the D2 stage, the change in the nitrogen removal performance of the filler under the condition of a year-long stable operation was studied. The variation in the microbial population before and after the operation of the embedded packing was studied by high-throughput sequencing and real-time quantitative PCR detecting system real-time (qPCR). In this research, the embedded denitrification filler had a water temperature of (24±1)℃, pH: 7.1, hydraulic retention time (HRT): 1 h, and filling rate: 10%. Sodium acetate was added to ensure stable operation for seven days. Under adequate carbon source conditions, the filler can adapt to the quality of secondary effluent water and achieve effluent TN < 5 mg·L⁻¹. By comparing and studying the effect of different HRT on the removal of filler TN, it is concluded that HRT is 30 min and the filling rate is 10%. After a year of stable operation under 7.2 m³·d⁻¹ influent conditions, the TN removal rate can reach 90.42%, and the total nitrogen in the effluent can be stabilized below 5 mg·L⁻¹. In comparison with the backwashing effect, the backwashing strength was 5.2 L·(m²·s)⁻¹, and the cycle is three days long. High-throughput sequencing and real-time quantitative PCR analysis results show that the abundance and copy number of denitrifying functional genus in the filler before and after the operation exhibited significant changes, which indicated that the bacteria could achieve good self-growth under embedding conditions.

Key words: microbial immobilization; embedded denitrification filler; deep denitrification; backwash; microbial community structure

目前大多数污水处理厂采用活性污泥法处理工艺^[1], 随着我国污水排放标准不断提高, 二级出水TN浓度难以达到要求^[2,3], 特别是冬季低温条件下细菌的生物活性较差, 造成出水的TN较高, 因此开展深度脱氮处理技术的研究具有重要意义^[4]。微生物反硝化作用是脱氮的主要途径, 目前反硝化生物滤池^[5~7]因占地面积小、操作流程简单等优点而被广泛地应用到二级出水的深度处理中, 其较为常见

的工艺形式有曝气生物滤池^[8]、反硝化生物滤池^[9]等, 虽然出水TN得到有效控制, 但其本身也存在着运行不稳定、易堵塞^[10~12]和反冲洗用水量过大等问题。

收稿日期: 2019-08-07; 修订日期: 2019-09-23

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(Z161100004516015)

作者简介: 周亚坤(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境恢复和水处理微生物技术, E-mail: 18911237510@163.com

* 通信作者, E-mail: yhong@bjut.edu.cn

微生物固定化技术^[13~15]作为现代生物工程中的一门新兴技术,在强化生物处理工艺方面有着显著的效果,自20世纪70年代起,固定化技术就已在污水处理行业开始应用. Chen等^[16]将磷酸化PVA包裹反硝化污泥用于废水脱氮,其实验原水为人工配水,针对市政污水复杂水质条件的脱氮效果并未作研究. 王静萱等^[17]以聚乙二醇为载体制作出包埋反硝化颗粒,研究不同工况条件对包埋固定化颗粒深度脱氮的影响,但其实验规模较小,同时对运行过程中微生物在填料上变化规律未作研究. Rezaee等^[18]将反硝化细菌固定在微生物纤维素上,在较高硝酸盐浓度($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下表现出良好的脱氮效果,但在低硝酸盐浓度下效果并不理想. Wang等^[19]以聚乙烯醇-海藻酸钠-粉末活性炭为固定化剂,制作的固定化球粒在间歇运行条件下表现出较强的反硝化能力,但连续流状态下效果不佳.

本实验利用课题组所建立的细菌包埋技术^[20],对驯化成熟的高效反硝化细菌^[21]进行包埋固定化,将制作完成的填料应用于北京某城市污水处理厂二沉池出水的深度脱氮研究,以期为该处理工艺的工程化应用提供了依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置和包埋填料的制备

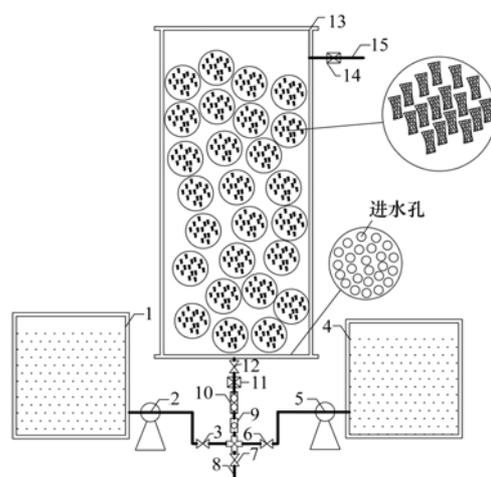
如图1所示,反应装置系统(DN池)主体为200 L有机玻璃柱,直径为0.4 m,高1.6 m. 采用上向流连续进水,进水管路设静态混合器,实现原水和外加碳源充分混合,同时设转子流量计,指示进水流量变化. 设加药泵一台,用于投加碳源,系统底部设有反冲洗管路.

包埋反硝化填料制作方法如下:将驯化成熟的高效反硝化细菌[比反硝化速率 $58\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$]离心浓缩至含水率为85%,将其与质量分数为15%的PVA凝胶混合成包埋液,将包埋液均匀涂装在圆柱形条状载体上,在过饱和的硼酸溶液中交联,最后切成1 cm长度的筒状填料,分装于悬浮填料球中,如图1中放大的部分所示.

1.2 实验水质与分析方法

本实验在北京某城市污水处理厂进行,原水为该处理厂A²O工艺二沉池出水,通过人工投加乙酸钠补充反硝化所需的碳源,通过一年的水质检测,其主要进水指标如表1所示.

依据标准分析法^[22]测定 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和COD浓度,其中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 分别采用纳氏试剂光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法和紫外分光光度法(UV-1600PC, MAPADA),



1. 二级出水水箱; 2. 进水流量泵; 3. 进水阀门; 4. 乙酸钠溶液箱; 5. 进乙酸钠流量泵; 6. 进乙酸钠阀门; 7. 反冲洗阀门; 8. 反冲洗管路; 9. 流量计; 10. 静态混合器; 11. 进水取样点; 12. 阀门; 13. 有机玻璃柱; 14. 出水取样点; 15. 出水管路

图1 包埋反硝化填料深度脱氮反应器(DN池)
Fig. 1 Deep denitrification reactor with embedded denitrification filler

COD采用连华科技COD快速测定仪测定, TN值利用MultiN/C3100TOC/TN仪测定, pH值利用上海三信PHS-3C型pH计测定, 温度由水银温度计测定.

表1 进水水质

水质指标	范围	平均值
$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	17.12~26.32	21.72
$\text{NO}_2^--\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01~0.09	0.05
$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.03~2.35	1.19
$\text{COD}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	24.63~52.46	38.54
$\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	18.49~27.66	23.07
$\text{P}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.1~0.6	0.35
pH	7.04~7.31	7.17

1.3 DN池的启动及稳定运行

本实验分为两部分: D1部分研究包埋反硝化填料对二级出水的适应性及其在不同HRT条件下对TN去除效果. 由于二级出水中有效COD浓度较低, 无法满足填料进行反硝化所需的碳源, 故采用人工投加乙酸钠的方式补充碳源. 将包埋制作完成的填料置于直径80 mm的孔状球中, 填充于DN池, 填充率为10%, HRT为1 h, pH为7.04~7.18, 进水温度在 $24\text{ }^\circ\text{C}\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, 对反应器进行驯化启动. DN池成功启动后, 以出水 $\text{TN}<5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为控制标准, 进一步对比不同HRT条件下, 包埋填料对TN的去除效果, 确定长期稳定运行的适宜HRT.

D2阶段DN池填充率为10%, 进水量为 $7.2\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, HRT为30 min, 连续稳定运行1 a, 进水温度变化范围为 $14\sim 26\text{ }^\circ\text{C}$, 研究其长期运行的稳定性以及对四季自然温度变化的适应性.

1.4 低 C/N 条件下包埋反硝化填料性能研究

污水厂二级出水中含有 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右的 COD,其可生化性较差,深度脱氮过程中利用率较低,若提高该部分 COD 的利用率,可有效减少外加碳源的投加量. DN 池成功启动后,在不外加碳源的情况下,连续运行 25 d,研究包埋反硝化填料对二级出水中 COD 的最大利用率.

1.5 微生物群落结构变化

1.5.1 宏基因组测序分析

分别取 DN 池运行前包埋填料样品 Y1 和长期稳定运行结束后的填料样品 ZYK-1,通过高通量测序,对比微生物群落结构变化,研究运行过程中反硝化细菌在填料上的生长繁殖.高通量测序利用 OMEGA 试剂盒从样本中提取 DNA,对细菌 16S rRNA V3-V4 区基因进行 PCR 扩增测序,引物设计为 V3 ~ V4 通用引物:341F 引物(CCCTACACGA CGCTCTCCGATCTG)和 805R 引物(GACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAG AATTCCA),通过 Illumina HiSeq2500 PE250 平台进行高通量测序,利用 MEGAN 软件进行环境微生物 16S 分析,可分别得到样本对应的优质序列,将各序列分成不同的聚类操作分类单元(OTUs),最后对 OTUs 结果进行分析计算,该工作由上海生工生物工程(上海)有限公司完成

1.5.2 绝对荧光定量 qPCR 检测分析

分别对样品 Y1 和 ZYK-1 进行绝对荧光定量 qPCR 检测,测定反硝化功能基因的数量,qPCR 检测设计引物序列为 *nirS*-1F[CCTA(C/T)TGGCCGCC(A/G)CA(A/G)T]和 *nirS*-6R[CGTTGAAGT(A/G)CCGGT],使用生工质粒提取试剂盒 B518191 SanPrep 提取质粒,构建好的质粒经测序鉴定无误后用微量分光光度计测定质粒 D_{260} 的值,通过公式换算成拷贝数($\text{copies}\cdot\text{mg}^{-1}$).荧光定量 qPCR 检测工作在生工生物工程(上海)有限公司完成.

2 结果与讨论

2.1 DN 池的驯化启动

如图 2 所示,从第 8 d 开始,反应器出水 TN 开始稳定在 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,且随进水 TN 的变化,出水 TN 浓度未见明显波动,此时进水 C/N 为 4.12,包埋反硝化填料对二级出水表现出了良好的适应性,经过 7 d 的运行 DN 池即可成功启动.

2.2 不同 HRT 条件下包埋反硝化填料 TN 去除效果研究

在出水 TN 稳定达标的前提下,HRT 越小则反应器的日处理能力越强,实验对比了 50、40、30 和 20 min 条件下包埋反硝化填料对 TN 的去除效果.

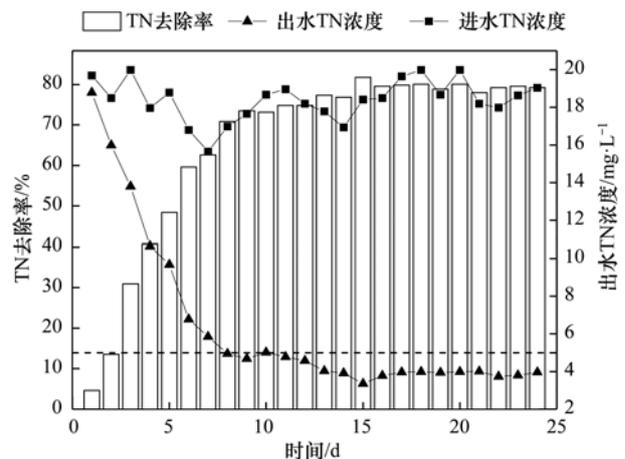


图 2 反硝化填料对二级出水的适应性研究

Fig. 2 Study of adaptability of denitrifying filler to secondary effluent

从图 3 可看出,当 HRT 由 60 min 降至 30 min 的过程中,反应器出水 TN 仍能保持在 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,分别用时 5、9 和 12 d.当 HRT 为 20 min 时,填料对 TN 的去除效果较差,出水 TN 在 $9.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.这可能由于反应时间较短,水流对填料的冲击负荷较大,使其活性受到影响,由此确定 30 min 为 DN 池稳定运行的适宜 HRT.这表明包埋填料具备一定的耐水流冲击负荷能力,可在较短 HRT 条件下,实现 TN 的稳定去除.

2.3 包埋反硝化填料对二级出水中 COD 利用率研究

从图 4 可看出,随 DN 池运行,包埋反硝化填料对二级出水中生化性较差的 COD 利用率在不断提高,最高可达到 67.5%,高于一般生物滤池的利用率^[23],这表明包埋反硝化填料可有效利用二级出水中生化性较差的 COD,从而减少深度脱氮过程中碳源的投加量,出水的 COD 可降至 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这低于《北京市地方水污染物综合排放标准》(DB 11/307-2013)中的 A 类标准($\text{COD} < 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2.4 反冲洗对包埋反硝化填料脱氮效果影响

2.4.1 反冲洗条件的确定

二级出水带有絮状杂质,随实验进行填料表面会出现杂质的积累,影响出水效果,当系统出水 TN 超过 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,需对系统进行反冲洗.通常普通滤池的冲洗强度和时间的通过膨胀率和反冲洗效果两方面来确定,但 DN 池构造有别于普通滤池,反冲洗时间和强度会影响填料的活性恢复和冲洗频率,综合填料表面杂质的脱落和出水水质情况,确定反冲洗强度为 $5.2 \text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,从图 5 可看出随着反冲洗时间的增长,填料活性恢复所用时间也在不断增加,这说明反冲洗过程中,水中的余氯以及水流对填料的冲刷会使得填料表面的微生物活性下降,所以反冲洗时间越长,填料反硝化活性恢复所用时间

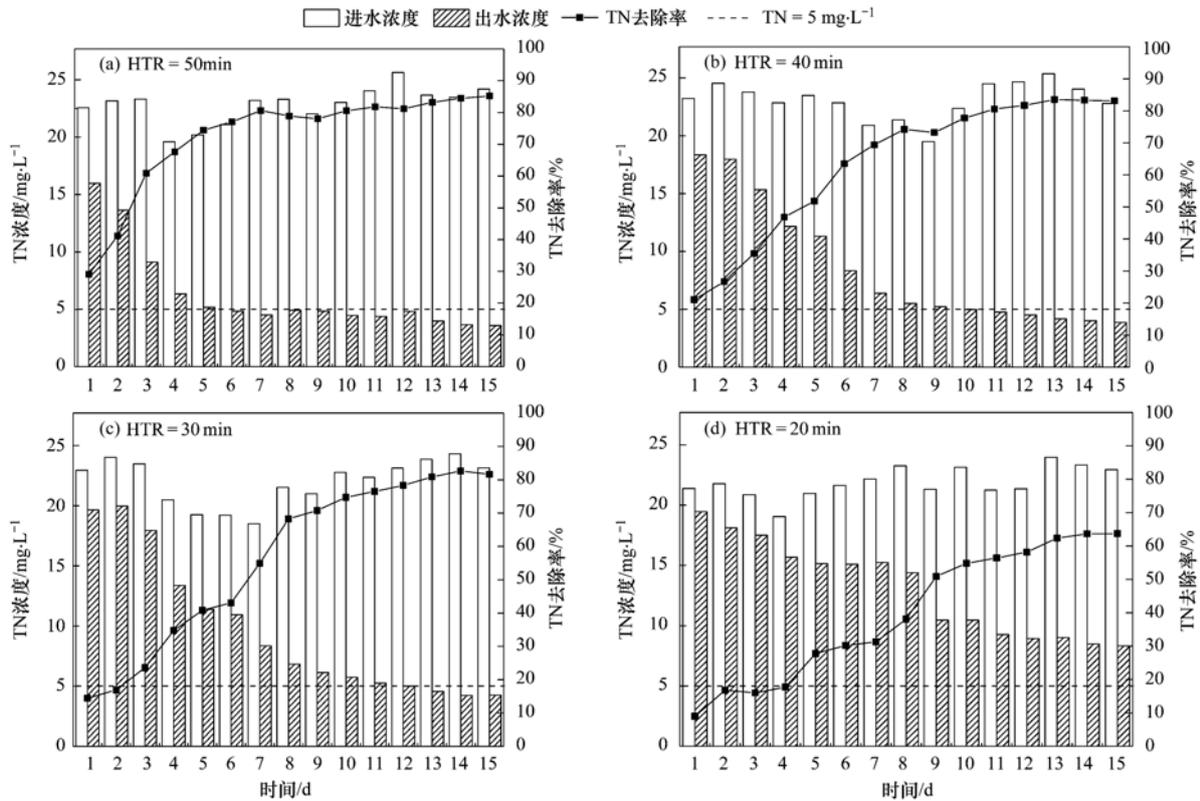


图3 包埋反硝化填料在不同 HRT 条件下 TN 去除效果

Fig. 3 TN removal by embedded denitrification filler under different HRT

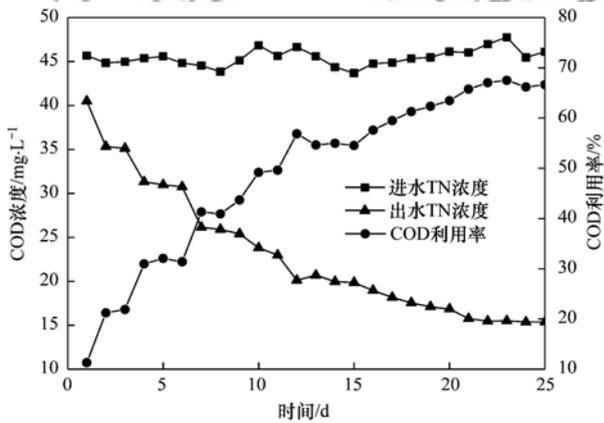


图4 包埋反硝化填料对二级出水 COD 利用率变化分析

Fig. 4 Analysis of change of COD utilization rate of secondary effluent by embedding denitrification

也越长. 另一方面,反冲洗时间与冲洗频率呈反比趋势,这说明反冲洗时间越长对 DN 池的冲洗也越彻底. 综合两者变化趋势,确定 DN 池适宜的反冲洗时间为 7 min.

2.4.2 反冲洗后运行时间与填料生物活性恢复时间研究

如图 6 所示,反冲洗过程中强劲的水流冲击会影响填料的生物活性,且由于实验条件所限,反冲洗用水为自来水带有少量余氯,所以在反冲洗结束后的短时间内,包埋填料 TN 去除率下降较为明显. 在 7 min 冲洗时间条件下,冲洗结束后运行 70 min 左

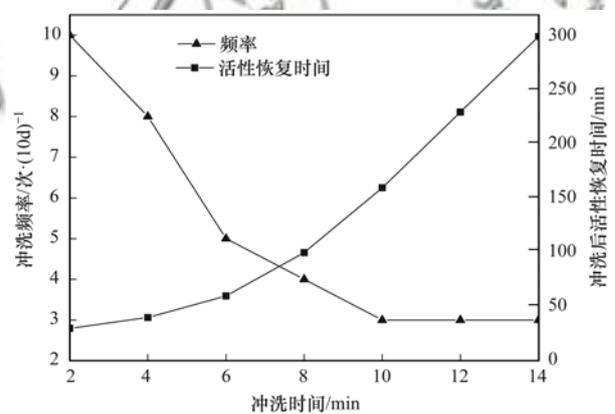


图5 不同反冲洗条件与填料活性恢复所用时间变化关系

Fig. 5 Relation between different backwashing conditions and recovery time of filler activity

右,出水 TN 即可小于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时认为填料完成活性恢复,这明显优于一般生物滤池 120 min 左右的冲洗后活性恢复时间^[24],表明反冲洗过程并未造成填料上细菌的流失,包埋填料对微生物有良好的保护作用,可抵抗一定强度的水流冲击.

2.5 DN 池对四季温度变化的适应性研究

D2 阶段 DN 池稳定运行的进水量为 $7.2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,HRT 为 30 min, DN 池成功启动后稳定运行 1 a,自然水温变化范围为 $14 \sim 28^\circ\text{C}$. 从图 7 可以看出,随冬季温度降低, DN 池进水 TN 浓度有升高趋势,出水 TN 出现小幅波动,但仍保持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以

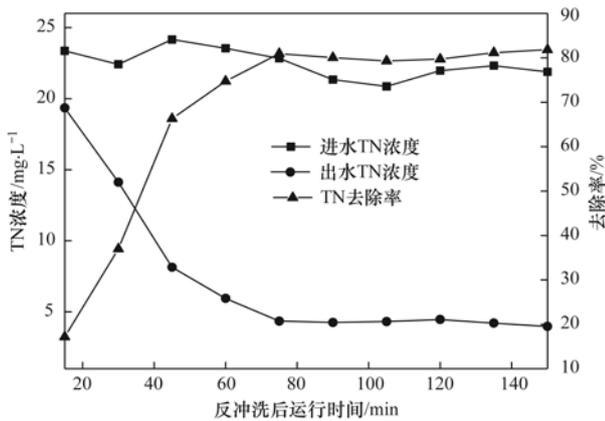


图6 反硝化填料反冲洗后运行时间与活性恢复时间

Fig. 6 Relation between run time and activity recovery time of denitrifying filler

下,这表明 DN 池在中试规模条件下稳定运行,出水 TN 可稳定在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,同时随温度的四季变化以及进水 TN 的波动, DN 池出水较稳定,处理效果明显优于生物滤池工艺^[25],经过一年连续运行,填料在结构上也表现出良好的完整性。

2.6 微生物多样性变化分析

高通量测序可有效反映 DN 池运行前后包埋填

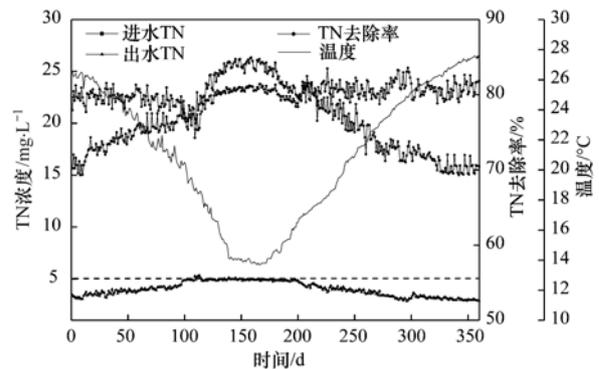


图7 DN池稳定运行TN去除效果与温度变化关系

Fig. 7 Relation between TN removal effect and temperature change in stable operation of DN pool

料上微生物的种群变化,表2为样本 α 多样性统计,其中 Y1 为 DN 池运行前的填料样本,ZYK-1 为稳定运行 1 a 后的样本,表中 Coverage 指数为样本文库覆盖率,其数值越高,则样本中序列被测出的概率越高,ACE 指数指示菌群丰富度,数值越大则丰富度越高,Shannon 和 Simpson 指数表示菌群多样性,Shannon 指数值越大表明群落多样性越高,Simpson 指数值越大表明群落多样性越低。

表2 包埋填料微生物多样性统计

Table 2 Microbial diversity statistics of embedded fillers

样本名称	序列数	OTUs	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Coverage 指数
Y1	50807	1314	42 658.43	2.4	0.2	0.98
ZYK-1	42120	4000	191 869.33	3.41	0.11	0.91

从表2可看出, DN 池运行前后对比,包埋填料上的 ACE 和 Shannon 指数都有明显增大,这说明填料上微生物的菌群丰度和多样性有了明显提高,表明广谱性反硝化菌有效地保留了以目标细菌为核心的菌群结构,为填料适应水质条件复杂的市政污水提供了菌群基础,也说明填料可成为良好的微生物生长载体。

2.7 微生物群落结构分析

包埋填料上微生物菌群多样性变化表明 DN 池运行前后填料上菌群结构发生了变化,反硝化细菌种类繁多,已被报道的多达 50 多个属, 130 多个种^[26],图8为包埋填料上微生物主要菌属分布(仅列出 1% 以上),可明显看出 Y1 中两种反硝化菌属 *Thauera* (44.32%) 和 *Paracoccus* (31.36%) 为主要优势菌属,这从微生物层面解释了 DN 池快速启动的原因。经市政污水运行后填料上反硝化功能菌属多样性有所提高,数量上明显增加的 *Pseudomonas* (15.26%) 和 *Comamonas* (2.58%) 均为污水处理中常见的反硝化菌属,而 *Thauera* (31.27%) 和 *Paracoccus* (19.9%) 仍保持明显菌群优势,这保证了

包埋反硝化填料良好的脱氮性能。经市政污水运行后的填料上逐步形成了广谱性的反硝化脱氮菌群,这使包埋填料具备了抵抗温度、水质条件变化的能力,保证了 DN 池长期运行的出水 TN 稳定在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

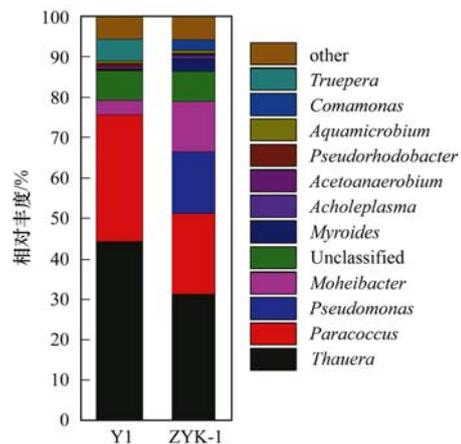


图8 反硝化填料运行前后微生物群落结构对比(属层面)

Fig. 8 Contrast in microbial community structure before and after denitrification filler operation (generic level)

2.8 包埋反硝化填料反硝化功能基因分析

反硝化过程分为两部分,由亚硝酸盐转化为氧化氮的过程是反硝化有别于其他硝酸盐代谢的标志性反应,亚硝酸盐还原酶(*nir*)是此反应重要的催化酶,同时 *nir* 基因也是反硝化功能基因中研究最多的基因^[27,28],其分为两种类型,一种为可溶性含铜酶,由 *nirK* 基因编码,另一种为细胞色素还原酶,由 *nirS* 编码。其中 *nirS* 为反硝化细菌检测的一个重要靶基因。

从表3可看出,反硝化功能基因 *nirS* 拷贝数由 $5.04 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 增长到 $1.33 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,这表明 DN 池运行过程中,由反硝化功能基因编码的细菌总量得到了提升,这说明反硝化功能菌属可在填料上生长繁殖,从而保证了填料高效的脱氮效率。

表3 反硝化功能基因定量分析

Table 3 Quantitative analysis of functional denitrification gene *nirS*

样本名称	扩增效率/%	基因拷贝数 /copies·g ⁻¹
Y1	88.2	5.04×10^8
ZYK-1	99.2	1.33×10^9

3 结论

(1)包埋反硝化填料能快速适应污水厂二级出水水质,可有效抵抗市政污水水质条件及四季温度的变化,使出水 TN 稳定在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

(2)包埋反硝化填料对二级出水中 COD 的利用率最高可达到 67.5%,从而有效降低了外加碳源的投加量,降低了出水 COD 的浓度。

(3)高通量测序分析表明,填料经稳定运行,核心功能菌多样性得到了提高,形成了广谱性的反硝化脱氮菌群。

(4)qPCR 检测分析显示,运行后反硝化功能基因拷贝数有了明显增加,这表明具有反硝化功能的菌属数量有所增加,证明填料可以成为良好的微生物生长繁殖载体。

参考文献:

- [1] Yang C, Zhang W, Liu R H, *et al.* Phylogenetic diversity and metabolic potential of activated sludge microbial communities in full-scale wastewater treatment plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(17): 7408-7415.
- [2] Acero J L, Benitez F J, Leal A I, *et al.* Membrane filtration technologies applied to municipal secondary effluents for potential reuse[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1-3): 390-398.
- [3] 潘碌亭,谢欣珏,王九成,等. 脱氮除磷生物滤池填料制备及其对农村生活污水的处理效果[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(9): 230-236.
- Pan L T, Xie X J, Wang J C, *et al.* Preparation of denitrification and dephosphorization biological fillers and its effect on treatment

- of rural domestic sewage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(9): 230-236.
- [4] 孙迎雪,胡银翠,孙云祥,等. 反硝化生物滤池深度脱氮机理[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(6): 1857-1862.
- Sun Y X, Hu Y C, Sun Y X, *et al.* Denitrification biological filter as tertiary treatment for nitrogen removal[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2012, **6**(6): 1857-1862.
- [5] 李鑫玮,阜崴,魏威,等. 反硝化滤池深度脱氮效能分析及工程应用[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(21): 132-136.
- Li X W, Fu W, Wei W, *et al.* Efficiency analysis and engineering application for advanced nitrogen removal in denitrification biofilter[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(21): 132-136.
- [6] Pujol R, Hamon M, Kandel X, *et al.* Biofilters: flexible, reliable biological reactors[J]. *Water Science & Technology*, 1994, **29**(10-11): 33-38.
- [7] Cox H H, Moerman R E, Van Baalen S, *et al.* Performance of a styrene-degrading biofilter containing the yeast *Exophiala jeanselmei*[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, **53**(3): 259-266.
- [8] 张勇,王淑莹,赵伟华,等. 中试规模 AAO-曝气生物滤池双污泥系统的启动运行[J]. *化工学报*, 2015, **66**(10): 4228-4235.
- Zhang Y, Wang S Y, Zhao W H, *et al.* Start-up of pilot-scale AAO-BAF two-sludge system[J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(10): 4228-4235.
- [9] 江肖良,李孟,张少辉,等. 4种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5503-5513.
- Jiang X L, Li M, Zhang S H, *et al.* Purification efficiency and microbial characteristics of four biofilters operated under different conditions[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5503-5513.
- [10] 徐建斌. 一体化生物滤池处理城市污水试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [11] Cui B, Liu X H, Yang Q, *et al.* Achieving partial denitrification through control of biofilm structure during biofilm growth in denitrifying biofilter[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **238**: 223-231.
- [12] Kent T D, Fitzpatrick C S B, Williams S C. Testing of biological aerated filter (BAF) media[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(3-4): 363-370.
- [13] 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.
- Ouyang L H, Zhou W L, Zhang Z J, *et al.* Study on sulfur-based autotrophic denitrification by immobilized pellets [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1644-1652.
- [14] 王里奥,崔志强,钱宗琴,等. 微生物固定化的发展及在废水处理中的应用[J]. *重庆大学学报*, 2004, **27**(3): 125-129.
- Wang L A, Cui Z Q, Qian Z Q, *et al.* Advances in immobilized microorganism and its applications of wastewater treatment[J]. *Journal of Chongqing University*, 2004, **27**(3): 125-129.
- [15] 许晓毅,尤晓露,吕晨培,等. 包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 2052-2058.
- Xu X Y, You X L, Lü C P, *et al.* Nitrogen removal performance and microbial community analysis of activated sludge immobilization[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5):

- 2052-2058.
- [16] Chen K C, Wu J Y, Huang C C, *et al.* Decolorization of azo dye using PVA-immobilized microorganisms [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, **101**(3): 241-252.
- [17] 王静萱, 李军, 张振家, 等. 固定化包埋颗粒对二级出水深度脱氮特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(2): 389-394.
- Wang J X, Li J, Zhang Z J, *et al.* Nitrogen removal of the secondary effluent by embedded immobilized bacteria in moving-bed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(2): 389-394.
- [18] Rezaee A, Godini H, Bakhtou H. Microbial cellulose as support material for the immobilization of denitrifying bacteria [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2008, **7**(5): 589-594.
- [19] Wang P, Yuan Y Z, Li Q, *et al.* Isolation and immobilization of new aerobic denitrifying bacteria [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **76**: 12-17.
- [20] 杨宏, 姚仁达, 尚海源, 等. 一种基于网状载体的反硝化细菌固定化直筒状生物活性填料制备及应用 [P]. 中国专利: CN 103951050A, 2014-04-04.
- [21] 孟婷, 杨宏. 高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3816-3822.
- Meng T, Yang H. Rapid culture, microbial community structure, and diversity of high-efficiency denitrifying bacteria [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3816-3822.
- [22] 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.
- [23] 孙颖. 曝气生物滤池处理二级出水的试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [24] 李雨霏, 韩洪军, 胡宏博, 等. 前置反硝化生物滤池菌群功能恢复研究 [J]. *安全与环境学报*, 2011, **11**(3): 32-35.
- Li Y F, Han H J, Hu H B, *et al.* On the functional recovery of microbial community in pre-denitrification aerated filter [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, **11**(3): 32-35.
- [25] Chen S D, Chen C Y, Wang Y F. Treating high-strength nitrate wastewater by three biological processes [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(10-11): 311-314.
- [26] 肖晶晶, 郭萍, 霍炜洁, 等. 反硝化微生物在污水脱氮中的研究及应用进展 [J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(12): 97-102.
- Xiao J J, Gou P, Huo W J, *et al.* Application of denitrifying microbes to wastewater denitrification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(12): 97-102.
- [27] Braker G, Zhou J Z, Wu L Y, *et al.* Nitrite reductase genes (*nirK* and *nirS*) as functional markers to investigate diversity of denitrifying bacteria in Pacific Northwest marine sediment communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(5): 2096-2104.
- [28] 张旭志, 杨倩倩, 赵俊, 等. 反硝化功能基因 *nirS* 和 *nirK* 及其检测技术研究进展 [J]. *微生物学杂志*, 2018, **38**(4): 84-91.
- Zhang X Z, Yang Q Q, Zhao J, *et al.* Advances in denitrification functional gene *nirS* and *nirK* and their detection technology [J]. *Journal of Microbiology*, 2018, **38**(4): 84-91.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)