

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 寒林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能

唐义¹, 马邕文^{1,2*}, 万金泉^{1,2}, 王艳^{1,2}, 叶刚¹

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 广东省植物纤维高值化清洁利用工程技术研究中心, 广州 510641)

摘要: 传统生物脱氮工艺处理废水过程中,出水硝态氮(NO_3^- -N)浓度过高是导致总氮(TN)超标的主要原因。通过采用外加碳源提高碳氮比(C/N),强化反硝化过程可有效解决这一难题。利用基于两段反硝化工艺原理研发设计的一体化脱氮反应器,通过在第二段反硝化池投加聚丁二酸丁二醇酯(PBS),采用扫描电子显微镜,对反硝化过程前后PBS材料进行表征,采用扩增子测序,深入探究投加PBS前后,第二段反硝化池中微生物群落结构变化。连续120 d的运行数据表明,COD去除率从95.7%降到90.8%,总氮去除率从51.8%提高到80%,Proteobacteria菌门相对丰富度从36.1%上升到46.1%,*Thermomonas*菌属相对丰富度从6.47%上升到13.48%。结果表明,投加PBS后,PBS不仅可以为反硝化作用提供碳源,其表面还可作为微生物生长附着的载体,起到良好的挂膜作用,同时提高了反硝化菌丰富度,强化了反硝化过程,脱氮性能明显增强,有效提高系统总氮去除率。

关键词: 两段反硝化; 碳氮比; 固体缓释碳源; 脱氮; 微生物群落

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3392-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010194

Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source

TANG Yi¹, MA Yong-wen^{1,2*}, WAN Jin-quan^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, YE Gang¹

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Engineering and Technology Research Center of Plant Fiber High-value Cleaning and Utilization, Guangzhou 510641, China)

Abstract: During wastewater treatment using a traditional biological denitrification process, the excessive concentration of nitrate nitrogen (NO_3^- -N) in the effluent is the primary cause of excessive total nitrogen (TN) generation. By using an external carbon source to increase the carbon to nitrogen ratio (C/N), the denitrification process can be strengthened, which effectively addresses this problem. Using an integrated denitrification reactor developed based on the two-stage denitrification process principle with the addition of polybutylene succinate (PBS) in the second stage, the denitrification process was analyzed using a scanning electron microscope before and after characterization of PBS materials. Moreover, amplicon sequencing was used for in-depth exploration of changes in the microbial community structure in the second denitrification pool before and after the addition of PBS. The data of a continuous 120-day experiment showed that the COD removal rate dropped from 95.7% to 90.8%, the TN removal rate increased from 51.8% to 80%, the relative abundance of Proteobacteria phylum rose from 36.1% to 46.1%, and the relative abundance of *Thermomonas* rose from 6.47% to 13.48%. The results show that after the addition of PBS, PBS can not only provide carbon source for denitrification, but its surface can also serve as a carrier for microbial growth and attachment, play a good role in filming, and increase the abundance of denitrifying bacteria and strengthen denitrification. During the nitrification process, denitrification performance was significantly enhanced, effectively improving the TN removal rate of the system.

Key words: two-stage denitrification; C/N; solid slow-release carbon source; denitrification; microbial community

近年来,TN去除成为城镇生活污水处理的重点和难点^[1,2]。生活污水中的TN主要由硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)和氨氮(NH_4^+ -N)组成^[3,4]。在传统脱氮工艺中,当反硝化池中的C/N低于4或5时^[5],C/N成为异养反硝化过程的主要限制因素^[6],反硝化细菌难以将 NO_3^- -N还原为氮气(N_2),出水TN超标。通常污水厂会投加甲醇、乙醇和乙酸等液态碳源^[7],但液态碳源存在成本高、操作要求严格以及缓释性能差等缺点,固体缓释碳源的经济性能和可持续性能优异^[8,9]。常见的固体缓释碳源包括农业废弃物、聚己内酯(PCL)和PBS^[10]等。PCL等聚合物的合成研究受到广泛关注^[11]; PBS固相反硝化生物膜反应器处理城镇生活污水,

TN去除率超过90%^[12,13]。

本研究在两段反硝化原理基础上,自主设计一体化生物脱氮反应器,进行实验室规模的废水处理实验,发现该反应器对污染物有显著的去除效果。在第二段反硝化池中投加碳源PBS^[14,15],强化反硝化过程,进一步提高TN去除率。

分析比较投加PBS前后出水总氮去除率和氮元素浓度分布,探究该反应器运行最佳工艺条件,着重考察PBS对于第二段反硝化池中微生物群落的

收稿日期: 2020-10-26; 修订日期: 2020-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570586, 31670585)

作者简介: 唐义(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向废水生物脱氮,E-mail: 736302457@qq.com

* 通信作者,E-mail: ppywma@scut.edu.cn

影响. 结果显示,一方面,PBS 在提供碳源的同时,可作为微生物生长附着的载体材料;另一方面,PBS 表面形成的生物膜,可堵塞材料表面孔隙,减缓可溶性有机物的流失,降低碳源释放速率,确保脱氮系统中 C/N 的稳定.

1 材料与方法

1.1 实验装置

反应器结构示意图如图 1 所示. 反应器为有机玻璃材质,长×宽×高=90 cm×40 cm×50 cm,有效体积 140 L.

从左到右依次为一段反硝化池、好氧池、二段反硝化池和沉淀池. 各池容积比为 1:3:1:1,池内挂有生物组合填料(比表面积:3 300~3 800 m²·m⁻³,总孔隙率大于 99%,规格为 150 mm×100 mm),好氧池内安有曝气装置.

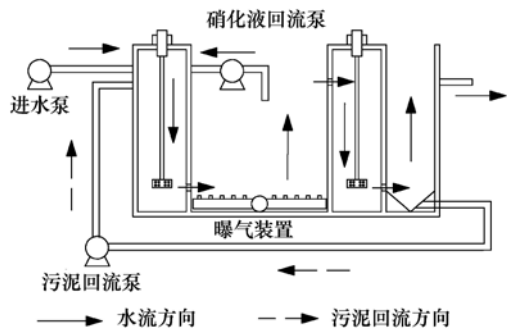


图 1 反应器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the reactor structure

1.2 原水水质

人工模拟城镇生活污水水质组成如表 1,各项水质指标范围如表 2 所示.

表 1 人工配水的水质组成¹⁾

Table 1 Water quality composition of artificial water distribution

名称	浓度/mg·L ⁻¹	名称	浓度/mg·L ⁻¹
葡萄糖	220~270	氯化钙	8~12
氯化铵	20~30	硫酸镁	18~21
磷酸二氢钾	4~6	七水硫酸亚铁	9~13
碳酸氢钠	100~120	微量元素 I 和 II	各 0.5 mL·L ⁻¹

1) 微量元素 I: EDTA 5 g·L⁻¹ 和 FeSO₄ 5 g·L⁻¹; 微量元素 II: EDTA 15 g·L⁻¹、H₃BO₄ 0.014 g·L⁻¹、MnCl₂·4H₂O 0.99 g·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O 0.25 g·L⁻¹、ZnSO₄·7H₂O 0.43 g·L⁻¹、NiCl₂·6H₂O 0.19 g·L⁻¹、NaSeO₄·10H₂O 0.21 g·L⁻¹ 和 NaMoO₄·2H₂O 0.22 g·L⁻¹

表 2 进水平均水质/mg·L⁻¹

Table 2 Average water qualities/mg·L⁻¹

水质指标	COD	氨氮	总氮	总磷
范围	230~280	20~30	20~30	3~8
均值	250	25	25	5

1.3 实验程序

本实验用活性污泥取自广州市猎德生活污水处理厂好氧池和缺氧池,各阶段控制参数如下:

接种:取 50 L 活性污泥稀释,投入到反应器中,控制 MLSS 在 3 000~3 500 mg·L⁻¹,SV 30% 左右.

第一阶段(0~60 d):驯化培养阶段.逐步增加流量到设计流量 12 L·h⁻¹,该工艺 HRT 约为 20 h,前置反硝化过程 3.6 h,好氧硝化过程 10.8 h,后置反硝化过程 3.6 h,沉淀过程 2 h.控制好氧池 DO 约为 5 mg·L⁻¹,缺氧池 DO 约为 0.5 mg·L⁻¹,pH 为 8,温度为(27±2)℃.

第二阶段(61~150 d):强化脱氮阶段.保持各参数不变,在第二段反硝化池中投加一定量的 PBS,提高池中 C/N 比,强化反硝化过程,提高总氮去除率.

1.4 碳源释碳动力学研究

分别称取玉米芯、PCL 和 PBS 各 5 g,放入 1 L 反应瓶中,注入 800 mL 去离子水,温度为(25±1)℃,pH 为 7.2~7.5,分别在第 0、8、16、24、48、72、96、120、144 和 168 h 取样,测定溶解有机碳(DOC)浓度.碳源释碳过程的动力学拟合方程式见式(1).

一级动力学方程:

ln (M_∞ - M_t) / M_∞ = -kt (1)

式中,M_t指 t 时刻碳源释放量(mg·L⁻¹);M_∞指碳源释碳最大量(mg·L⁻¹);k 指碳源释碳常数;t 指时间(h).

1.5 正交试验

为探究外加 PBS 强化反硝化脱氮的最佳实验条件,选择环境温度、pH、碳源投加量和水力搅拌条件为考察因素,按照正交试验 L₉(3⁴)设计 4 因素和 3 水平的正交试验,分析比较各组条件的硝态氮去除率.

取第二段反硝化池中 250 mL 含水污泥于锥形瓶中.根据正交试验表控制各环境因素,放入摇床中连续培养观察,记录实验数据.

1.6 分析方法

1.6.1 水质指标分析

pH 采用 SLIM48 工业用 pH 计 HP-480 测定;COD 采用 HJ 828-2017 中重铬酸钾法测定;氨氮、亚硝态氮、硝态氮和总氮采用 UV-2600 分光光度计(Shimadzu,日本)测定;通过扫描电镜(S-3400N,日本)观察材料的微观形貌.

1.6.2 微生物群落结构分析

选取原污泥、运行 60 d 和 120 d 污泥进行高

通量测序,采用 CTAB 方法提取样本的基因组 DNA,采用琼脂糖凝胶电泳仪进行 DNA 纯度和浓度检测。

取适量样本 DNA 于离心管中,用超纯水稀释至 $1 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$. 对 16S rDNA 的 V4 区进行 PCR 扩增,PCR 扩增所用仪器为 New England Biolabs 公司的 Phusion High-Fidelity PCR Master Mix with GC Buffer 和高效高保真酶,反应条件: 98°C 预变性 1 min, 然后 30 个循环(98°C 变性 10 s, 50°C 退火 30 s, 72°C 延伸 30 s), 最后 72°C 延伸 5 min. 采用 Thermofisher 公司的 Ion Plus Fragment Library Kit 48 rxns 试剂盒构建文库,待 Qubit 定量和文库检测合格后,利用 Thermofisher 的 IonS5TMXL 进行上机测序^[16].

2 结果与分析

2.1 COD 的去除

图 2 为出水 COD 浓度和 COD 去除率,图 3 为出水 COD 频率分布。

运行期间,出水 COD 从 $87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中未加 PBS 阶段平均出水 COD 为 $54.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 COD 集中在 $60 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,COD 去

除率最高为 95.7%,该反应器对 COD 去除效果好;加入 PBS 阶段平均出水 COD 为 $36.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 COD 在排放标准 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下的频率为 86.7%,该反应器运行稳定. 投加 PBS 初期,二段反硝化池中的微生物不适应新环境,导致部分出水 COD 超标;微生物适应新环境后,PBS 释放的有机物作为电子供体参与到反硝化过程被消耗,出水 COD 逐渐降低,COD 去除率从 77.4% 升至 91.7%,出水 COD 稳定达标。

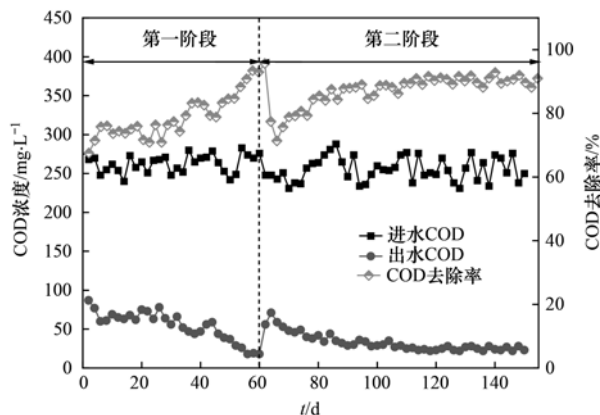


图 2 出水 COD 浓度和 COD 去除率

Fig. 2 Effluent COD concentration and COD removal rate

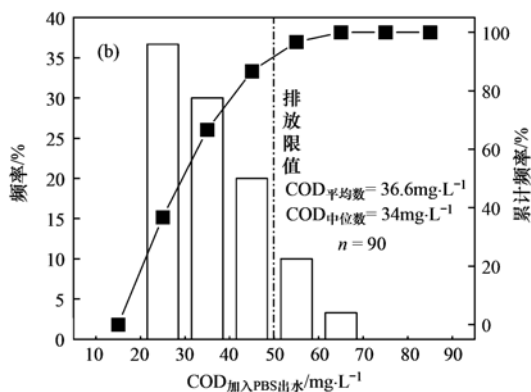
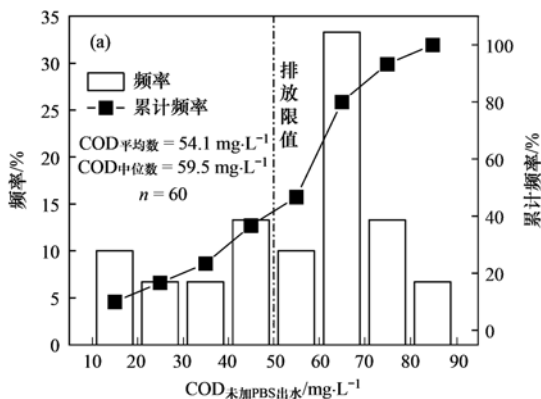


图 3 出水 COD 频率分布

Fig. 3 COD frequency distribution of effluent

2.2 氮的去除

图 4 是出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度和 TN 去除率,图 5 是出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 频率分布。

60 d 数据表明,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 去除率达到 57%,该反应器脱氮性能较好. 图 5(c) 表明,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 集中在 $7 \sim 7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高可达 $8.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,导致出水 TN 去除率难以提升;加 PBS 后,出水 TN 去除率显著提升至 80%,由图 5(b) 和 5(d) 可知,94% 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,平均 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出水从 $7.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $3.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 出水从 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 投加

PBS 初期,反硝化细菌不适应新环境,TN 去除率变化不大;随后,反硝化细菌逐渐适应新环境,还原 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 N_2 ,脱氮性能大幅提升。

2.3 碳源释放性能

PBS、PCL 和玉米芯的 DOC 释放曲线如图 6 所示,动力学拟合方程如表 3 所示。

由图 6 可知,各碳源释放 DOC 可分为快速阶段 ($\leq 24 \text{ h}$) 和慢速阶段 ($> 24 \text{ h}$). 快速阶段,各碳源 DOC 释放量占总释放量的 54.5% ~ 95.9%,慢速阶段为 4.1% ~ 45.5%. 各碳源 DOC 释放量占总释放量 50% 的时间顺序为玉米芯 < PCL < PBS,PBS 缓释性能较好. DOC 累计释放量大小顺序为 PCL < PBS

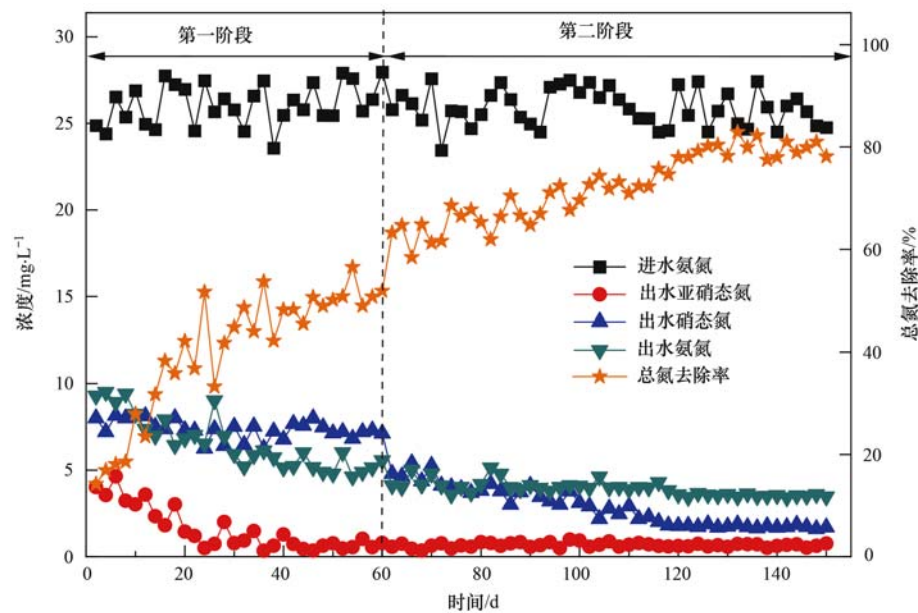


图 4 出水NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 浓度和 TN 去除率

Fig. 4 Effluent NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N concentration, and TN removal rate

< 玉米芯, PCL 碳源释放量过小无法提高 C/N, 玉米芯过大易使出水 COD 超标, 而 PBS 适中, 适合作为外加碳源材料。

由表 3 可知, 各碳源释放的快速阶段和慢速阶段用一级动力学进行拟合, R^2 表示拟合方程的相关

系数。各碳源释放过程基本符合一级动力学方程, 碳源释放量和时间成正比。

2.4 正交试验

挑选影响因子温度 (A)、pH (B)、碳源投加量 (C) 和水力搅拌条件 (D), 按正交试验 $L_9(3^4)$ 设计 4 因素和 3 水平。正交试验影响因素水平见表 4, 结果见表 5。

表 3 DOC 释放过程的动力学拟合

Table 3 Kinetic fitting of DOC release process

碳源	阶段	动力学方程	R^2	拟合方程
PBS	快速	一级	0.990 4	$y = -0.019 4x - 0.285$
	慢速	一级	0.971 9	$y = -0.031x + 0.403 6$
PCL	快速	一级	0.999 5	$y = -0.136 3x + 0.135 7$
	慢速	一级	0.932 6	$y = -0.025 8x - 1.844 5$
玉米芯	快速	一级	0.997 6	$y = -0.089 5x + 0.087 1$
	慢速	一级	0.991 8	$y = -0.020 5x - 1.554 1$

表 4 $L_9(3^4)$ 正交试验影响因素水平

Table 4 Influencing factors of $L_9(3^4)$ orthogonal test

水平	因素			
	温度 (A) /℃	pH (B)	碳源投加量 (C) /g·L ⁻¹	水力搅拌条件 (D) /r·min ⁻¹
1	20	6	2	50
2	27	7	4	100
3	34	8	6	150

表 5 正交试验结果¹⁾

Table 5 Orthogonal test results

编号	温度 (A)	pH (B)	碳源投加量 (C)	水力搅拌条件 (D)	NO ₃ ⁻ -N 去除率/%
1	1	1	1	1	48.1
2	1	2	2	2	75.8
3	1	3	3	3	92.1
4	2	1	2	3	54.7
5	2	2	3	1	71.4
6	2	3	1	2	59.0
7	3	1	3	2	78.0
8	3	2	1	3	60.2
9	3	3	2	1	63.7
k_1 /%	77.0	60.3	55.8	61.1	
k_2 /%	61.7	69.1	64.7	70.9	
k_3 /%	67.3	71.6	80.5	69.0	
R /%	15.3	11.3	24.7	9.8	

优选试验条件为: A₁B₃C₃D₃

1) 均值 k_1 (第一列) = 温度为 20℃ 时 NO₃⁻-N 去除率的平均值, 极差 R (第一列) = 第一列 k_1 、 k_2 和 k_3 取最大值与最小值之差, 同理可得其他均值 k 和极差 R , 其中 R 值越大说明该因素对 NO₃⁻-N 去除率影响越大

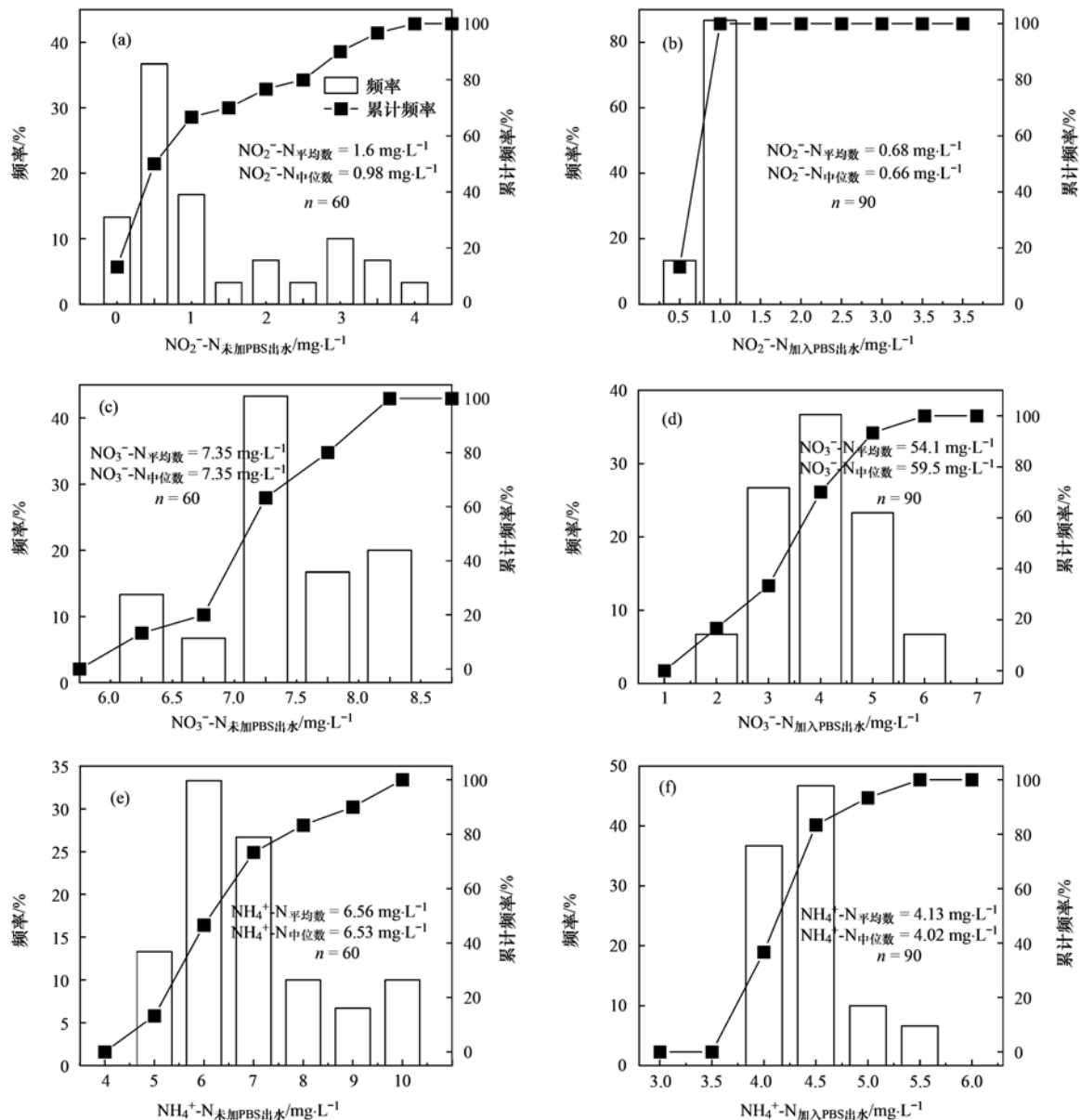


图5 出水氨氮、亚硝态氮和硝态氮频率分布

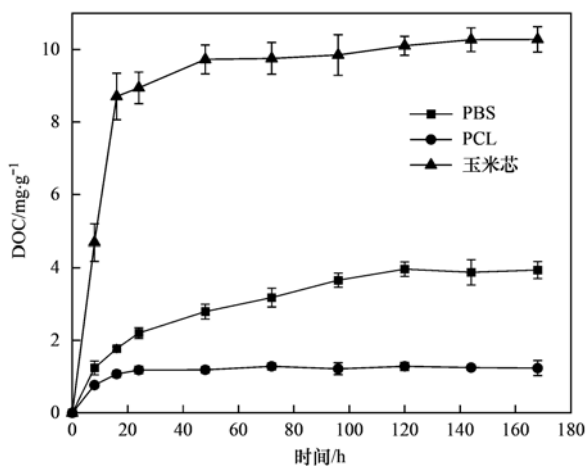
Fig. 5 Frequency distribution of effluent NH_4^+-N , NO_2^--N , and NO_3^--N 

图6 不同碳源 DOC 释放曲线

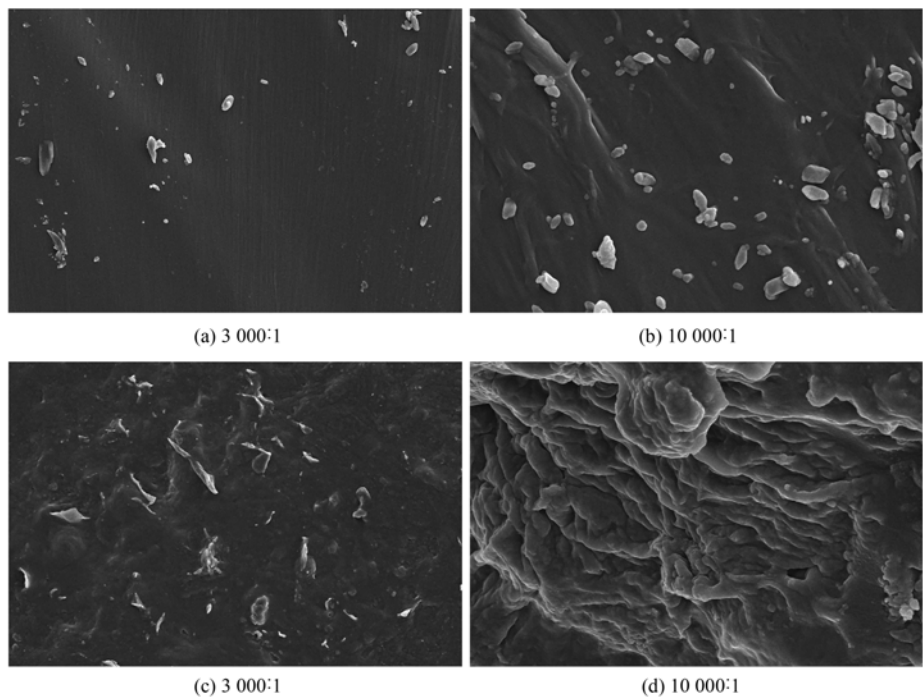
Fig. 6 DOC release curve of different carbon sources

由表4可知,各因素对强化反硝化作用的影响次序为: $C > A > B > D$,最优方案为温度 20°C , pH8, 碳源投加量 $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,水力搅拌条件 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,硝态氮去除率可达92.1%。

3 讨论

3.1 固体缓释碳源表面结构变化特征

采用SEM和EDS-Mapping观察PBS表面结构。图7表明,反硝化后PBS表面较反应前更为粗糙,且有活性污泥附着;图8可知,反硝化前PBS表面只有碳元素和氧元素,而反硝化后表面出现了磷、硅和氯元素,这些元素是微生物生长繁殖必需的微量元素。PBS不仅可以提供碳源,还是微生物生长附着的载体材料。



(a)和(b)反硝化反应前; (c)和(d)反硝化反应后

图7 PBS 的扫描电镜图

Fig. 7 SEM of PBS

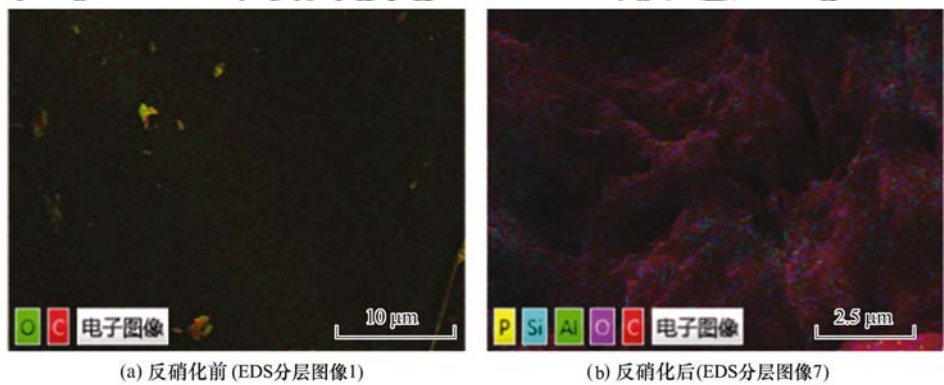


图8 PBS 的 EDS-Mapping 图

Fig. 8 EDS-Mapping of PBS

3.2 高通量测序

未加入 PBS 的活性污泥样本 1、加入 PBS 30 d 的样本 2 和加入 PBS 60 d 的样本 3,采用高通量测序对细菌 16S V4 区测序.

3.2.1 加入固体缓释碳源对微生物多样性的影响

在活性污泥系统中微生物多样性越高,系统调节能力越强,越有利于抵抗外部环境的变化,保证工艺的稳定运行^[17~19]. Shannon 指数和 Simpson 指数

可以反映微生物群落的多样性,Chao 指数与 ACE 指数常用来反映物种丰富度^[20,21].

表 6 显示,样本 2 和 3 的 Chao 指数和 ACE 指数远大于样本 1,PBS 的加入提高了微生物丰富度. 样本 2 和 3 的 Shannon 指数远大于样本 1,微生物多样性更丰富. 随着时间的增加,样本 3 比样本 2 Chao 指数和 ACE 指数略有增加,微生物丰富度增大; Simpson 指数基本保持不变,该区域常见物种未受影响.

表 6 不同时期微生物多样性

Table 6 Microbial diversity in different periods

样本编号 ¹⁾	Chao 指数	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
1	648.3	649.3	4.779	0.026
2	761.5	755.3	5.411	0.031
3	769.9	763.6	5.574	0.031

1) 1 为未加入 PBS 的污泥样本, 2 为加入 PBS 30 d 的污泥样本, 3 为加入 PBS 60 d 的污泥样本

3.2.2 加入固体缓释碳源对微生物群落结构的影响

图9为门水平和属水平的微生物群落相对丰度, Proteobacteria 和 Bacteroidetes 为优势菌门, 是生物脱氮过程中应用最广泛的反硝化门类^[22,23], Proteobacteria 与全球碳氮循环有关^[24,25]. Proteobacteria 在样品1、2和3中的相对比例分别为36.1%、46.9%和46.1%, Bacteroidetes 为33.6%、39%和40.7%.

属水平分析可知, *Thermomonas*、*Flavobacterium* 和 *Haliangium* 为优势菌属, 均与反硝化过程有关. *Thermomonas* 在厌氧反硝化中具有更好的反硝化性能^[26]. *Thermomonas* 在样品1、样品2和样品3中的相对比例分别为6.47%、8.38%和13.48%, *Flavobacterium* 分别为9.79%、10.45%和11.42%, *Haliangium* 分别为3.49%、8.72%和9.8%.

加入PBS有利于反硝化细菌的生长繁殖, 强化反硝化过程, 给该阶段总氮去除率的增加提供有力依据.

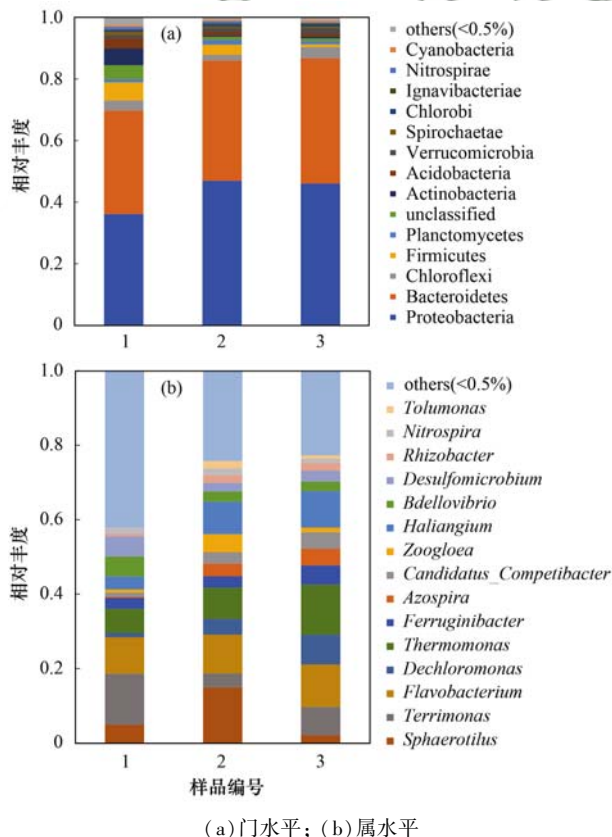


图9 主要微生物群落组成的相对丰度

Fig. 9 Relative abundance of major microbial community composition

4 结论

(1)一体化脱氮反应器去污效果良好, COD 去除率95.7%, TN 去除率57%; 外加PBS强化反硝化

阶段, 出水 NO_3^- -N 浓度集中在 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率上升至80%.

(2)碳源释碳动力学研究表明, 各碳源释碳过程基本满足一级动力学方程, PBS 具有更好的缓释性能; 正交试验结果表明, 该反应器的最佳运行条件为温度 20°C , pH 为8, 碳源投加量 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 水力搅拌条件 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

(3)SEM 和 EDS-Mapping 结果表明, PBS 可作为微生物附着生长的载体材料.

(4)高通量测序分析, 外加 PBS 提高了二段反硝化池中微生物群落的种类和丰富度, Proteobacteria 为优势菌门, 相对丰富度为46.1%, *Thermomonas* 为优势菌属, 相对丰富度为13.48%.

参考文献:

- [1] Chen Z G, Wang X J, Chen X Z, et al. Nitrogen removal via nitrification pathway for low-strength ammonium wastewater by adsorption, biological desorption and denitrification [J]. Bioresource Technology, 2018, **267**: 541-549.
- [2] 王琳琳. 改性沸石吸附材料制备及其对水中硝态氮去除性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Wang L L. Preparation of modified zeolite adsorption materials and its removal performance of nitrate from aqueous solution [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [3] 王晓磊, 押玉荣, 吴江渤, 等. DN/CN 强化脱氮技术在污水厂提标改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2020, **36**(11): 15-20.
Wang X L, Ya Y R, Wu J B, et al. Application of DN/CN enhanced nitrogen removal technology in upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, **36**(11): 15-20.
- [4] Ma B, Qian W T, Yuan C S, et al. Achieving mainstream nitrogen removal through coupling anammox with denitrification [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(15): 8405-8413.
- [5] 袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 等. 不同曝气量和好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1382-1389.
Yuan M F, Yu D S, Gong X Z, et al. Nitrogen and phosphorus removal from low C/N municipal wastewater treated by a SPNDPR system with different aeration and aerobic times [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1382-1389.
- [6] 王萌萌, 曹刚, 张迪, 等. 异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2787-2795.
Wang M M, Cao G, Zhang D, et al. Removal of urea by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification mixed strains and effects of heavy metals and salinity [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2787-2795.
- [7] 王晓春. AGSBR 处理养猪场废水的效能及同步去除抗生素的机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Wang X C. The performance of AGSBR for swine wastewater treatment and its mechanism for antibiotic removal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [8] Liu J J, Yuan Y, Li B K, et al. Enhanced nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in an anaerobic-aerobic-anoxic sequencing batch reactor with sludge fermentation

- products as carbon source[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **244**: 1158-1165.
- [9] 程璐璐. 多碳源复合载体的释碳及其强化微生物脱氮过程研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- Cheng L L. Study on function of carbon release and enhanced microbial denitrification process of multi-carbon source composite carriers[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [10] 周秀秀, 王艺霖, 刘丽红, 等. 以聚乙烯醇为骨架材料的固相碳源反硝化脱氮试验研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(10): 1198-1201, 1238.
- Zhou X X, Wang Z L, Liu L H, *et al.* Denitrification of the solid carbon source with polyvinyl alcohol as framework material[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(10): 1198-1201, 1238.
- [11] Xiong R, Yu X X, Yu L J, *et al.* Biological denitrification using polycaprolactone-peanut shell as slow-release carbon source treating drainage of municipal WWTP[J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 434-439.
- [12] Han F, Ye W, Wei D, *et al.* Simultaneous nitrification-denitrification and membrane fouling alleviation in a submerged biofilm membrane bioreactor with coupling of sponge and biodegradable PBS carrier[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **270**: 156-165.
- [13] Han F, Wei D, Ngo H H, *et al.* Performance, microbial community and fluorescent characteristic of microbial products in a solid-phase denitrification biofilm reactor for WWTP effluent treatment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **227**: 375-385.
- [14] 徐林建, 潘杨, 章豪, 等. 好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3179-3185.
- Xu L J, Pan Y, Zhang H, *et al.* Effects of aerobic carbon sources on biofilm with simultaneous phosphate removal and enrichment[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3179-3185.
- [15] Zhao Y X, Liu D, Huang W L, *et al.* Insights into biofilm carriers for biological wastewater treatment processes: current state-of-the-art, challenges, and opportunities[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **288**, doi: 10.1016/j.biortech. 2019.121619.
- [16] 张兰河, 赵倩男, 郑晶, 等. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 共存对 SBR 工艺生物脱氮和微生物群落结构的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(10): 3256-3264.
- Zhang L H, Zhao Q N, Zheng J, *et al.* Effect of the coexistence of Ca^{2+} and Mg^{2+} on the biological denitrification and microbial community structure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(10): 3256-3264.
- [17] 陈鑫宇, 王道雄, 潘飞, 等. 基于高通量测序的 OMS-2 对序批式反应器系统微生物群落的影响[J]. *环境工程学报*, 2020, **14**(1): 244-252.
- Chen X Y, Wang D X, Pan F, *et al.* Effect of OMS-2 on microbial community of SBR system through high-throughput sequencing[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(1): 244-252.
- [18] 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 等. 淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 321-329.
- Zhao T T, Qiao K, Wang L, *et al.* Measurements of bacterial community and biodiversity from activated sludge for a wastewater treatment containing starch[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 321-329.
- [19] 张潇, 赵博玮, 岳秀萍. 取消初沉池对 AAO 工艺活性污泥微生物结构的影响[J]. *工业水处理*, 2019, **39**(6): 30-34.
- Zhang X, Zhao B W, Yue X P. Influences of canceling primary settling tanks on the microbial structure of activated sludge in AAO process[J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, **39**(6): 30-34.
- [20] 宁高阳, 牛永健, 李维维, 等. C/N 对 SBR 生物脱氮硝化过程微生物结构的动态影响[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 2053-2061.
- Ning G Y, Niu Y J, Li W W, *et al.* Dynamic effect of C/N on microbial structure in SBR's biological nitrification process[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 2053-2061.
- [21] 张莉, 林佳宁, 张远, 等. ITS 高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2368-2379.
- Zhang L, Lin J N, Zhang Y, *et al.* Eukaryotic micro-plankton community diversity and characteristics of regional distribution in the Yellow Sea by ITS high-throughput sequencing[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2368-2379.
- [22] Fang D X, Zhao G, Xu X Y, *et al.* Microbial community structures and functions of wastewater treatment systems in plateau and cold regions[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **249**: 684-693.
- [23] Sun G P, Wan J F, Sun Y C, *et al.* Enhanced removal of nitrate and refractory organic pollutants from bio-treated coking wastewater using corncoals as carbon sources and biofilm carriers[J]. *Chemosphere*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.chemosphere. 2019.124520.
- [24] Qiu G L, Zuniga-Montanez R, Law Y Y, *et al.* Polyphosphate-accumulating organisms in full-scale tropical wastewater treatment plants use diverse carbon sources[J]. *Water Research*, 2019, **149**: 496-510.
- [25] Xing W, Zhang W Q, Li D S, *et al.* An integrated O/A two-stage packed-bed reactor (INT-PBR) for total nitrogen removal from low organic carbon wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **328**: 894-903.
- [26] 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 等. 耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4195-4201.
- Zhao Q, Liu M Y, Lv H, *et al.* Setup and microbial community analysis of ANAMMOX system for landfill leachate treatment coupling partial nitrification-denitrification process[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4195-4201.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)