

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期

Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)

天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)

重庆市主城区 O₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析
..... 李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)

汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)

2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)

北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)

郑州市 PM_{2.5} 组分、来源及其演变特征 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)

上海市 PM_{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应 程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)

粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)

河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)

广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)

天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)

河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)

重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)

城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)

白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征
..... 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)

夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)

洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)

农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)

沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)

微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)

磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)

潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)

三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锟, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)

淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)

DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 丁翔, 李志武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)

市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)

亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)

A²/O 与倒置 A²/O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)

厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析
..... 闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)

活性污泥微生物群落结构与与环境因素响应关系分析 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)

汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)

基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)

典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价
..... 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)

大气 CO₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N₂O 排放的影响 于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)

椰糠生物炭对热区双季稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)

不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N₂O 排放的影响
..... 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)

物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)

米利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)

黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应
..... 林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)

秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)

镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响
..... 陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)

岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)

锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)

不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)

4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制 丁园, 教师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)

叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)

镉对不同生长期籽粒菟植物螯合肽的影响 刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)

中国造纸业物质代谢演化特征 刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)

《环境科学》征订启事(3651) 《环境科学》征稿简则(3718) 信息(3836, 3885, 3893)

亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响

王文琪¹, 李冬^{1*}, 高鑫¹, 张杰^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 为了探究亚硝酸盐生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响, 采用2组同规格SBR反应器分别在连续和间歇曝气方式下使亚硝酸盐连续生成和间歇生成, 考察其运行过程中脱氮除磷效果、污泥物理特性和微生物群落结构。结果表明, 亚硝酸盐间歇生成后随即消耗, 具有更好和更稳定的脱氮除磷性能, 特别在TN去除上, 第72 d后TN平均去除率为92.07%。碳源利用效率(以P/COD计)集中在0.21~0.22 mg·mg⁻¹, 碳源利用充分, 进一步促进反硝化除磷。颗粒粒径分布集中, 大小均匀, 具有规则的形状和清晰的边界。微生物群落分析表明, 亚硝酸盐间歇生成的系统微生物群落丰富度和多样性更高, 同时富集了更多DPAOs菌属(*Dechloromonas*和*Pseudomonas*), 与*Nitrosomonas*共同作用使短程硝化与反硝化除磷达到动态平衡, 实现系统稳定运行。

关键词: 亚硝酸盐; 连续生成; 间歇生成; 短程硝化反硝化除磷; 颗粒污泥

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3858-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101242

Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System

WANG Wen-qi¹, LI Dong^{1*}, GAO Xin¹, ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To explore the effects of nitrite generation on the system of short-cut nitrification denitrifying phosphorus removal granules, nitrite was produced continuously and intermittently, under continuous and intermittent aeration, in two groups of SBR reactors of the same size. The effects of nitrogen and phosphorus removal, physical characteristics of the sludge, and microbial community structure were investigated. Nitrite was consumed immediately after intermittent production, with better and more stable nitrogen and phosphorus removal performance. In particular, the average rate of TN removal was 92.07% after 72 days. The utilization efficiency of the carbon source (by P/COD) was concentrated at 0.21-0.22 mg·mg⁻¹, to ensure full utilization of the carbon source and to further promote denitrification and phosphorus removal. Particle sizes were uniform and showed concentrated distribution, with particles exhibiting regular shapes and clear boundaries. Microbial community analysis showed that the abundance and diversity of microbial communities were higher in the intermittent nitrite system and more enriched in DPAOs genera (*Dechloromonas* and *Pseudomonas*). The combination of DPAOs genera and *Nitrosomonas* resulted in a dynamic balance and stable operation of the short-cut nitrification and denitrifying phosphorus removal system.

Key words: nitrite; continuous generation; intermittent generation; short-cut nitrification denitrifying phosphorus removal; granules sludge

短程硝化反硝化除磷工艺在氨氧化菌(AOB)和反硝化聚磷菌(DPAOs)的作用下,在同一反应器内完成脱氮和除磷,具有可节约25%能耗与40%碳源,达到污泥减量等优点^[1]。在缺氧条件下,DPAOs利用细胞内的内碳源作为电子供体,以亚硝酸盐作为电子受体进行同步脱氮除磷,一碳两用,解决了传统工艺中脱氮和除磷在碳源争夺上的根本矛盾^[2]。有研究通过比较O₂、NO₃⁻和NO₂⁻的除磷效果,发现NO₂⁻作为电子受体最具反应速率快的优势^[3]。作为硝化和反硝化的中间产物,亚硝酸盐能够在一定条件下生成并积累^[4]。然而,高浓度的亚硝酸盐会影响除磷效果以

及对硝化菌和反硝化菌等多种微生物活性产生抑制作用^[5]。可见,亚硝酸盐的生成对于短程硝化反硝化除磷系统的稳定运行有着重要的影响。

亚硝酸盐的生成可由曝气策略来调控,将硝化反应停留在亚硝酸盐阶段。目前研究中的曝气段主要采用连续曝气,亚硝酸盐连续生成并积累,在后续

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-02-03

基金项目: 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910005019); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-001)

作者简介: 王文琪(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为水质科学与水环境恢复技术, E-mail: wangwq0227@163.com

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

缺氧段完成反硝化除磷. 但亚硝酸盐积累过高会出现抑制作用, 影响系统的处理性能, 且长时间的连续曝气后期溶解氧含量逐渐升高, 易出现全程硝化. 间歇曝气则被认为是抑制亚硝酸盐氧化菌 (NOB), 实现亚硝酸盐积累的有效策略^[6]. 亚硝酸盐在间歇曝气下间歇生成随即消耗, 可减少亚硝酸盐抑制作用, 且 NOB 无法以亚硝酸盐为底物进行增殖, 从而被淘汰出系统. 因此, 合理调控亚硝酸盐间歇生成有利于提高除磷效果和维持系统稳定运行.

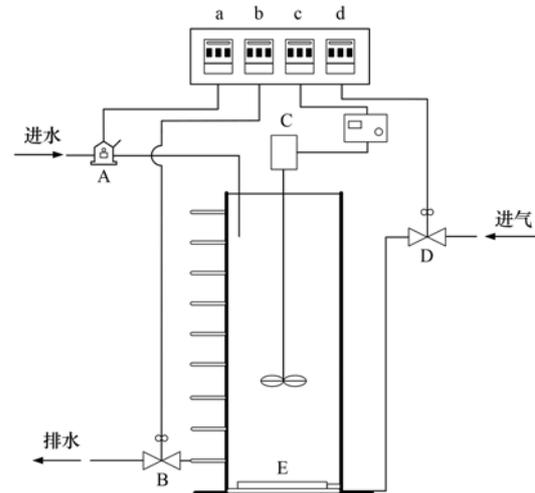
本研究设置 2 组同规格 SBR 反应器, 其中一组采用间歇曝气使亚硝酸盐间歇生成并消耗, 另一组采用连续曝气使亚硝酸盐连续生成作为对照. 通过对比 2 组反应器的运行情况, 考察了亚硝酸盐连续生成和间歇生成 2 种方式下对系统中污染物质去除性能、污泥物理特性及微生物群落的综合影响, 通过补充和完善亚硝酸盐不同生成方式的影响, 以期短程硝化反硝化除磷系统的高效稳定运行提供更合理的亚硝酸盐生成方式.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方法

本实验采用有机玻璃制成的 SBR 反应器, 实验

装置如图 1 所示. 反应器有效容积为 6 L, 换水比为 2/3, 共 2 组. 每天 4 个周期, 每周运行 360 min, 包括进水 5 min, 沉淀 3 min, 排水 5 min, 其余时间闲置, 实验具体参数见表 1. 运行期内全程搅拌, 控制污泥龄为 30 d.



A 表示进水泵, B 表示排水电磁阀, C 表示搅拌器, D 表示曝气电磁阀, E 表示曝气盘, a、b、c 和 d 表示时控开关

图 1 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥反应器示意
Fig. 1 Schematic of short-cut nitrification denitrifying phosphorus removal granules

表 1 反应器运行工况

Table 1 Operational conditions of the reactor

反应器	阶段	时间/d	厌氧时长 /min	好氧时长 /min	缺氧时长 /min	曝停时间 (好氧: 缺氧) /min	曝停频次	曝气量 /L·(h·L) ⁻¹
R1	I	1~45	120	140	80	—	—	3.5
	II	46~92	120	120	100	—	—	3.5
R2	I	1~45	120	140	80	(35:20)	4	3.5
	II	46~92	120	120	100	(30:25)	4	3.5

1.2 接种污泥与实验用水

本实验用水为人工配水, 由自来水、CH₃CH₂COONa、(NH₄)₂SO₄、KH₂PO₄、NaHCO₃、CaCl₂ 和 MgSO₄·7H₂O 配置而成, 以 NaHCO₃ 模拟生

活污水碱度并调节 pH 值稳定, 具体水质指标如表 2. 实验中所采用的接种污泥是有良好脱氮除磷性能的短程硝化反硝化除磷颗粒污泥, 污泥浓度为 3 500 mg·L⁻¹.

表 2 人工配水水质情况

Table 2 Water quality of artificial water

项目	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹	pH
数值	230~240	48~55	<1	0~2	7~8	7.6~8.0

1.3 分析项目与检测方法

NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO₃⁻-N 采用麝香草酚紫外分光光度法; COD 和 TP 的测定采用 5B-3B 型 COD 多参数快速测定仪, 每 2 d 对上述参数进行测

量; DO 和 pH 的测定均采用 WTW-pH/Oxi 340i 便携式多参数测定仪监测. MLSS、MLVSS 和 SVI 等指标均采用国家规定的标准方法^[7]. 高通量测序及系统发育树的绘制工作由 ALLWEGENE 公司(中国, 北京)完成, 其 DNA 提取、PCR 扩增、高通量测序及

数据处理过程如文献[8]所述.

1.4 碳源利用效率 $\Delta p(P)/\Delta(COD)$ 的计算方法

$$\frac{\Delta p(P)}{\Delta(COD)} = \frac{\text{厌氧比释磷速率}}{\text{厌氧 COD 降解速率}}$$

式中,厌氧比释磷速率以 P/SS 计, $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 厌氧 COD 降解速率以 COD/SS 计, $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 亚硝酸盐生成方式对系统处理性能的影响

2.1.1 COD 和 TP 去除性能

本实验过程中对 COD 和 TP 的去除性能如图 2 所示. 厌氧段发生 DPAOs 的内碳源储存以及残留 NO_x^- -N 的去除, 绝大部分 COD 在厌氧段消耗, 为后续反硝化吸磷提供充足的聚- β -羟基丁酸盐 (PHB) 碳源, 实现“一碳两用”. 后期厌氧末 COD 浓度与出

水 COD 浓度相近, 都在 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 远低于我国污水综合排放标准一级 A 标准 ($50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), COD 去除率平稳保持在 90% 以上. $\Delta p(P)/\Delta(COD)$ 为碳源利用效率, 可说明系统中聚磷菌的活性^[9, 10]. 阶段 I 有充足的碳源用以厌氧释磷, 释磷量可达到 $46.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. R1 和 R2 的碳源利用效率(以 P/COD 计)均在 $0.19 \sim 0.21 \text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$, 此时 DPAOs 有较高的活性. 从图 2(a) 中能够看出 R1 的 P 去除效果并不理想, 这是由于 P 在好氧段几乎就被吸收, 进入缺氧段后出现释磷现象, NO_2^- 反应不全后进入下一周期, 优先使用碳源进行反硝化, 从而影响厌氧释磷, 且对污泥有毒害作用. R2 则在间歇曝气下交替好/缺氧, 一定的 NO_2^- 生成量和充足的底物 P 进入缺氧段反硝化吸磷, P 去除率维持在 90% 以上, 如图 2(b) 所示.

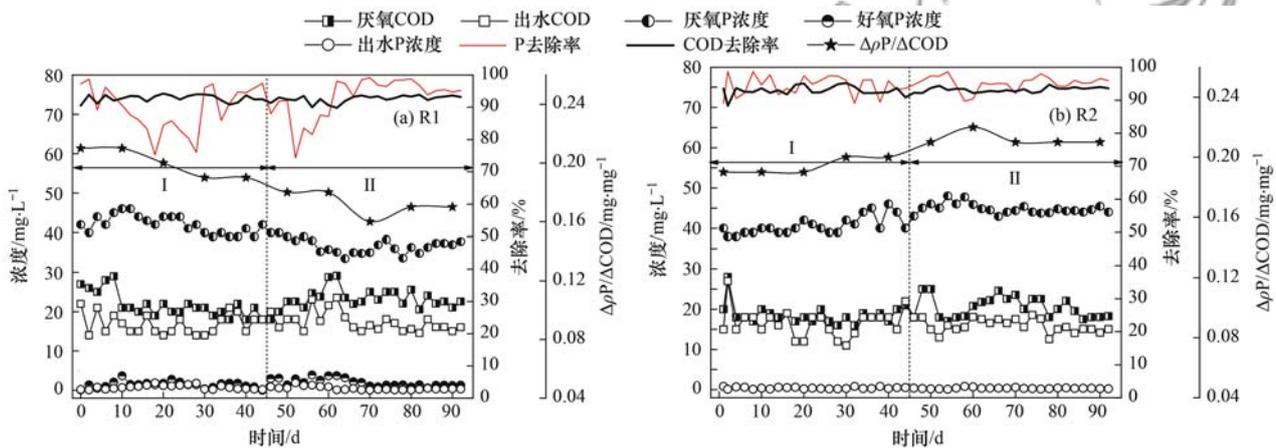


图 2 运行期内 COD 和 TP 浓度变化

Fig. 2 Variation in COD and TP concentration during operation

阶段 II 随着好氧段氨氧化作用和吸磷作用的加强, NO_2^- 不断积累, 而缺氧段缺乏底物 P 的参与, 缺氧反硝化除磷不充分. 在总时长不变下, 缩短曝气时长并增加缺氧时长, 使 NO_2^- 和 P 充分反应. 第 45 d 之后 R1 的释磷量呈减少趋势, 释磷量降低影响了对挥发性脂肪酸(VFA)的摄取, 厌氧末 COD 浓度升高, 聚磷菌对内碳源的贡献率降低. $\Delta p(P)/\Delta(COD)$ 降至 $0.16 \sim 0.18 \text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$, 聚磷菌的活性受到抑制, 这是因为 NO_2^- 浓度的增加和剩余碳源进入缺氧段反硝化的干扰, 使 DPAOs 的活性受到抑制. 可见, 亚硝酸盐的连续生成未对 COD 的去除造成影响, 但破坏了反硝化除磷性能. R2 释磷量稳步保持在 $44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, $\Delta p(P)/\Delta(COD)$ 较阶段 I 更进一步地提高, 集中在 $0.21 \sim 0.22 \text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$, 更多的碳源被反硝化聚磷菌转化和合成 PHB, 更好地促进反硝化吸磷作用. 由此, 亚硝酸盐的间歇生成对稳定的除磷性能显示了较明显的优势.

2.1.2 脱氮性能

图 3 为系统运行期间氮元素变化的情况. R1 和 R2 皆有良好的短程硝化性能, NOB 被最大限度淘汰, 出水硝氮浓度大都接近 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 阶段 I 通过计算^[11] 可得 R1 好氧末平均亚硝酸盐积累率 (nitrogen accumulation rate, NAR) 为 91.17%, 亚硝酸盐积累稳定, 高浓度的亚硝酸盐进入缺氧段由于底物限制和活性抑制无法被充分利用, 导致反硝化吸磷效果较低, 从而降低了脱氮的效能. 从图 3(a) 中能看出, 阶段 I R1 的出水 NO_2^- 浓度最高已达 $6.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均 TN 去除率为 83.75%. 随着运行时间延长, R2 出水氨氮浓度不断降低, 氨氧化作用加强, 但由于好缺氧交替存在使亚硝酸盐间歇产生并随即消耗, 出水 NO_2^- 浓度始终维持在 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 此阶段 TN 平均去除率可达 91.63%.

阶段 II 缩短曝气时长后, R1 的出水氨氮浓度开始增加至 $9.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 去除率陡然降至

76.37%。由于颗粒污泥存在分区结构,且在 O_2 获取上 AOB 强于 $NOB^{[12]}$, AOB 仍在硝化菌群中占优势地位,连续生成积累的高浓度亚硝酸盐限制了 DPAOs 活性,但其出水 NO_2^- 浓度有所降低,分析原因是剩余碳源进入缺氧段以 NO_2^- 为电子受体进行反硝化反应,此外聚糖菌(GAOs)也能完成一定的脱氮作用^[13],在缺氧条件下以 NO_2^- 为电子受体完成内源反硝化。相较而言,R2 缩短的曝气时长平均分布在每组曝气频次上为 5 min,其对系统造成的影响

较小,高曝气频次可筛选氨氧化速率较快的 AOB,还可以长期维持较高的亚硝化。从图 3(b)中也能看出,出水氨氮浓度依然能够保持平稳,最高也仅为 $3.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氧化完全, TN 平均去除率为 92.07%。综上,在兼顾脱氮和除磷下,曝气时长的缩短是有限度的,亚硝酸盐连续生成不断积累,无法被充分利用,造成不利影响。而亚硝酸盐间歇生成能够很好地解决上述问题,同时促进 NO_2^- 为电子受体的反硝化吸磷效率,实现 TN 和 TP 稳定去除。

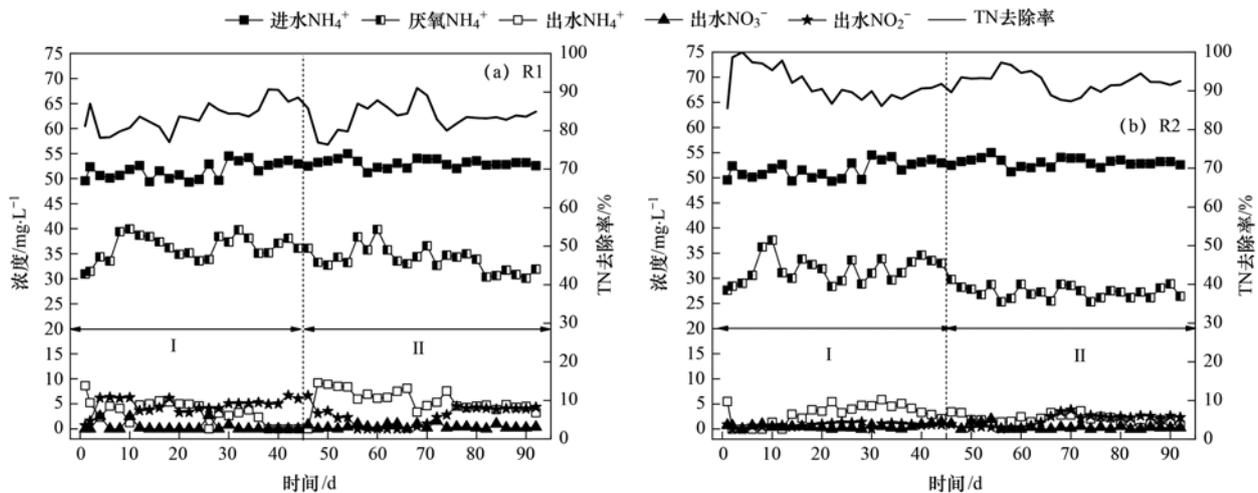


图3 运行期内出水 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 TN 浓度变化

Fig. 3 Variation in NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , and TN concentration during operation

2.2 典型周期实验污染物去除特性

为分析亚硝酸盐连续和间歇生成方式的影响,分别对 R1 和 R2 系统运行典型周期内(第 92 d)基质浓度变化情况进行分析,如图 4 所示。两种方式下都是前 60 min 内迅速释磷,并伴随着 COD 降解,厌氧末 COD 浓度降为 $22.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $18.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此亚硝酸盐不同生成方式对降解有机物影响较小。厌氧释磷量则有显著区别,R2 碳源绝大部分用于除磷,DPAOs 占有绝对优势,故释磷量维持在较高水平,其释磷量可达 $44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,明显高于 R1 的 $37.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。厌氧释磷量可指示聚磷菌体内 PHB 储存效果,PHB 分解为后续吸磷提供内源动力,能够看出 R1 厌氧段残留的 NO_2^- 优先争夺外碳源反硝化,从而降低了 DPAOs 的内碳源储存作用,图 4(c)中 pH 也先呈上升趋势,直到第 21 min 后 NO_2^- 反硝化完全,反硝化速率小于释磷速率后 pH 开始下降。R2 系统内残留的 NO_2^- 较低,为充分释磷创造了条件,在第 11 min 反硝化完全,pH 开始下降。这也侧面反映了如不对亚硝酸盐生成量加以平衡,则会影响厌氧释磷,从而造成后续吸磷动力不足。

进入好氧段后吸磷作用先占据主导,R1 的 P 浓

度在 220 min 时仅剩 $1.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时亚硝酸盐积累量增加至 $11.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可见亚硝酸盐积累对好氧吸磷影响不大,反而减弱了缺氧段反硝化除磷,高浓度亚硝酸盐与低基质 P 浓度无法充分反应,甚至在 330 min 时出现了缺氧释磷现象。高浓度亚硝酸盐进入缺氧段后对 DPAOs 活性同时也产生了一定的抑制作用,长时间的缺氧无法将少量 P 吸收去除,残留的亚硝酸盐则会进入下一周期厌氧段,影响释磷,因此维持好氧吸磷、缺氧吸磷以及氨氧化反应的平衡是 R1 亟待解决的问题,那么 R2 通过间歇曝气使亚硝酸盐间歇生成,好/缺氧的循环交替让亚硝酸盐的生成与消耗达到平衡。从图 4(b)中可看出 R2 每个好氧段生成亚硝酸盐浓度分别为 2.99 、 3.69 、 3.62 和 $3.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随即在缺氧段消耗并伴随着 P 的去除,其共生成累加值为 $13.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,高于 R1 的积累量 $11.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但由于每阶段亚硝酸盐浓度仅在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,DPAOs 活性未受抑制,也因好氧时间被分割,好氧吸磷减弱,进而缺氧段获取更多底物 P,增强了以 NO_2^- 为电子受体的反硝化除磷,实现同步脱氮除磷。

DO 和 pH 都与生化反应有良好的相关性,整个反应过程可由两者的变化来间接反映^[14]。R2 较于

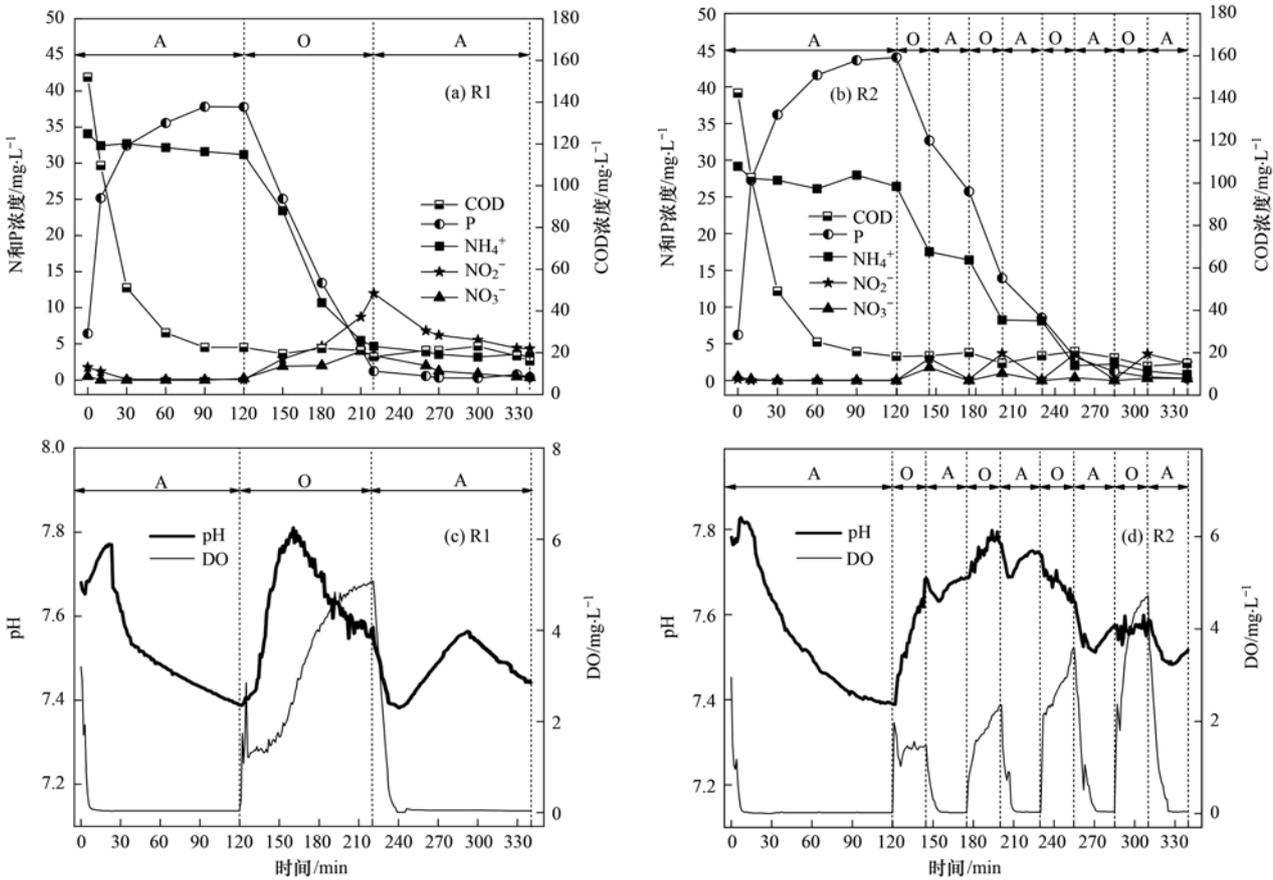


图4 运行期间典型周期内 C、N、P、DO 和 pH 变化情况

Fig. 4 Change in C, N, P, DO, and pH during a typical operation cycle

R1 系统内溶解氧浓度变化范围更小,更有利于实现 PHB 稳定分解使好氧吸磷、缺氧吸磷与硝化作用三者速率保持平衡,减少反硝化聚磷菌摄取 O_2 进行有氧呼吸从而降低反硝化除磷效率. 好氧初期 pH 上升吸磷反应占据优势,随着氨氧化反应消耗碱度的增强 pH 开始下降,R1 在好氧 40 min 后吸磷便减弱,氨氧化作用开始占主导,pH 出现拐点. R2 在第 3 段好氧时 pH 出现下降,出现拐点时间延后,更多底物 P 参与反硝化除磷. 在缺氧时,R2 的 pH 曲线在 DO 降为 0.05 mg/L 以下开始上升,与缺氧吸磷相符合. R1 的 pH 初期虽呈上升趋势,但以图 4(a) 中各基质浓度变化为据分析,为剩余碳源进入缺氧

段进行反硝化产生碱度,而缺氧吸磷反应微弱.

2.3 污泥粒径及外观形态特性

分别对 R1 和 R2 系统稳定运行 90 d 的成熟颗粒污泥测其粒径分布以及通过显微镜观察外观形态,如表 3 和图 5 所示. 可以看出,R2 粒径分布集中, $1000 \mu\text{m}$ 以上的颗粒占比达 67.78%, $500 \mu\text{m}$ 以下的颗粒仅占 0.04%,颗粒大小均匀. R1 则存在 3.32% 的污泥粒径小于 $500 \mu\text{m}$ 以下,出现了较多细小颗粒,同时在显微镜下能看到 R1 颗粒有丝状菌增殖. 有研究表明缺氧条件下存在亚硝酸盐时更易发生丝状菌膨胀,高浓度亚硝酸盐使功能菌贮存能力降低,从而丝状菌在底物竞争中获得优势,使污

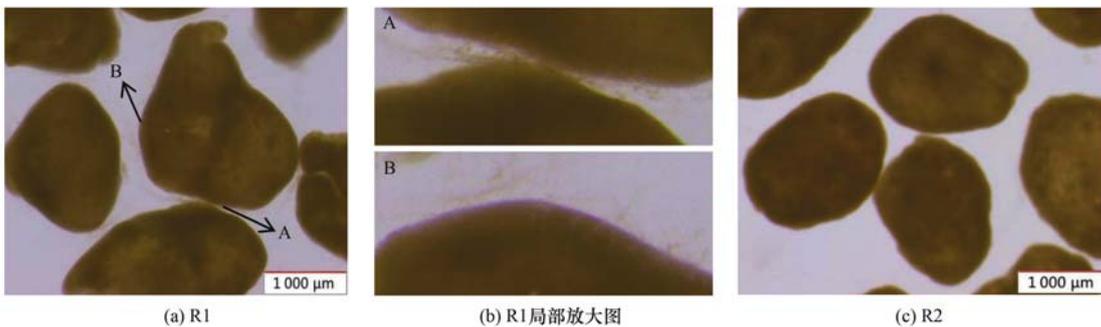


图5 第 90 d 显微镜照片

Fig. 5 Optical microscopy images of 90 d

泥解体流失,处理效果恶化^[15].因此结合上文脱氮除磷性能来看,亚硝酸盐连续生成进入缺氧后不仅产生抑制作用,同时对污泥粒径及形态也有不利影响.而 R2 颗粒圆滑,具有规则的形状和清晰的边界,结构密实,利于聚磷菌的富集,未出现丝状菌膨胀或颗粒解体等现象.

表 3 第 90 d 粒径范围内体积分数分布情况/%

Table 3 Distribution of volume percentage in the particle size range of 90 d/%

反应器	粒径范围/ μm			
	<250	250~500	500~1000	>1000
R1	3.15	0.17	38.87	57.81
R2	0	0.04	32.18	67.78

2.4 微生物菌群分析

为克服亚硝酸盐生成对污泥系统的不利影响,深度分析亚硝酸盐连续生成和间歇生成下颗粒污泥内微生物菌群的结构及多样性,探究污泥微生物与

表 4 不同污泥样品的 α 多样性分析

Table 4 The α diversity analysis of different sludge samples

样品	OTUs	PD_whole_tree	Simpson 指数	Chao1 指数	Shannon 指数
P1	351	33.00	0.95	354.98	5.47
P2	403	36.54	0.96	417.62	5.76

将样品中微生物群落从门到属进行分类,并对相对丰度大于 1% 的细菌群落进行了着重分析.在门水平上, R1 和 R2 主要为变形杆菌门 (Proteobacteria, 相对丰度 46.7% 和 64.9%) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes, 相对丰度 21.5% 和 24.8%), 变形杆菌门有去除氮和磷的性能, 总能发现其在群落中有最佳丰度^[16], 对比二者门水平可知, 亚硝酸盐连续生成会导致变形杆菌门丰度降低. 在纲水平上, R1 和 R2 的共同优势菌属有 β -变形菌纲 (β -Proteobacteria, 相对丰度 15.9% 和 26.1%), β -变形菌纲中的某些细菌为 AOB, 包括 *Nitrosomonas* 属和 *Nitrosopira* 属^[17], 其在 R2 明显含量更高, 说明亚硝酸盐间歇生成的良好效果并非是 AOB 氧化氨氮生成亚硝酸盐的缺少, 而是更多亚硝酸盐间歇生成并消耗, 避免了亚硝酸盐的抑制作用及残留.

R1 和 R2 细菌群落在属水平上的分布情况如图 6 所示. 从中可知, 二者微生物种属虽大多集中在变形菌门 (Proteobacteria), 但是亚硝酸盐生成方式使种群丰度结构有了明显变化. R1 中主要包括了 *Candidatus_Accumulibacter* (13.07%)、*Candidatus_Cometibacter* (5.98%)、*Zoogloea* (4.82%)、*Dermatophilus* (4.78%)、*Nitrosomonas* (4.38%) 和 *Ohtaekwangia* (4.36%) 等多种优势菌属, R2 中主要包括了 *Candidatus_Accumulibacter* (10%)、

系统处理性能之间的相关关系, 选取 R1 和 R2 稳定运行阶段内的污泥样品进行 MiSeq 高通量测序, 分别命名为 P1 和 P2, 分析结果如表 4 和图 6 所示. 不同样本微生物多样性之间的对比分析通过最少数列样本数据抽平后, 在 97% 的相似水平下进行 α 多样性分析, 并对非重复序列进行操作分类单元 (OTUs) 划分, 在 R1 和 R2 的污泥样本中分别得到 351 和 403 个 OTUs, 且样品的物种覆盖度 (coverage) 均为 1.00, 表明了此次高通量测序的结果能够代表样本中微生物的真实情况. Chao1 指数、Shannon 指数、Simpson 指数和 PD_whole_tree 表明系统中物种的丰富度和多样性, 其中 Simpson 指数兼顾丰富度和均匀度, 可从表 4 中看出 R2 系统内的物种种类数、多样性、丰富度及均一性均大于 R1, 一定程度上说明了亚硝酸盐连续生成对系统内微生物产生了抑制作用, 因此在不同的亚硝酸盐生成方式下对微生物群落产生较大差异的选择.

Flavobacterium (9.99%)、*Dermatophilus* (5.66%)、*Ohtaekwangia* (4.77%)、*Dechloromonas* (4.15%) 和 *Nitrosomonas* (4.08%) 等多种优势菌属.

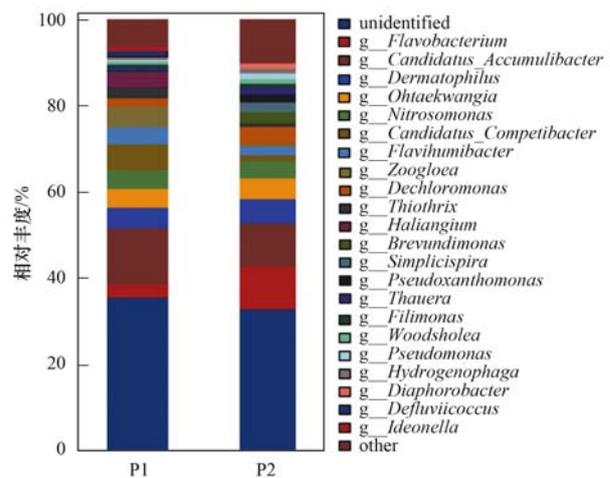


图 6 细菌群落在属水平上的分布

Fig. 6 Distribution of bacterial communities at the genus level

Candidatus_Accumulibacter 属为除磷菌属^[18], R1 和 R2 都以除磷为主导反应, 以亚硝酸盐为电子受体的反硝化聚磷菌 (NDPAOs) 属于 *Dechloromonas* 属^[19, 20], 其相对丰度分别为 1.91% 和 4.15%, 此外 *Pseudomonas* 属也是反硝化聚磷菌属^[21], 相对丰度分别为 0.36% 和 1.31%, 可明显看出 R2 富集了更多亚硝酸盐型反硝化聚磷菌. *Nitrosomonas* 属是一种

典型 AOB^[15], 其均为 R1 和 R2 的优势菌属, 系统具有良好的短程硝化性能. R2 中 *Dechloromonas* 属和 *Nitrosomonas* 属的配比为 1.02, 其能间接反映污泥中 AOB 与 NDPAOs 的配比, 推断 R2 亚硝酸盐间歇生成并消耗使短程硝化与反硝化除磷可达到动态平衡. *Candidatus_Competibacter* 属是聚糖菌菌属^[22], 在 R1 中丰度较高, 这也验证了上文对脱氮有一定贡献的猜想, NO₂⁻ 抑制 PAOs 活性而增强 GAOs 活性^[23], GAOs 过高会与 PAOs 争夺碳源而导致系统除磷效果变差. *Flaviumibacter* 属和 *Thiothrix* 属同为丝状菌属^[24, 25], 其丰度 R1 (3.97% 和 2.05%) 均大于 R2 (2.57% 和 0.75%), 导致 R1 丝状菌增殖明显. R2 次优势菌属 *Flavobacterium* 属为反硝化菌属^[26], 具有良好的反硝化脱氮效率, 从而 R2 的 TN 表现出更高的去除.

3 结论

(1) 从系统处理性能来看, R2 较 R1 具有更好和更稳定的脱氮除磷性能, 特别在 TN 去除上, R1 连续生成亚硝酸盐后无法消耗完全造成残留, 第 72 d 后 TN 平均去除率为 83.40%, R2 由于亚硝酸盐间歇生成并随即消耗, 促进以 NO₂⁻ 为电子受体的反硝化吸磷效率提高, 碳源利用效率 (以 P/COD 计) 集中在 0.21 ~ 0.22 mg·mg⁻¹, 碳源利用充分, 进一步促进反硝化除磷, 实现 TP 和 TN 稳定去除, 第 72 d 后 TN 平均去除率为 92.07%.

(2) 从污泥粒径和形态来看, R2 粒径分布集中, 颗粒大小均匀, 具有规则的形状和清晰的边界, 而 R1 由于亚硝酸盐连续生成积累使丝状菌增殖, 污泥解体流失, 处理效果恶化.

(3) 从微生物结构来看, R2 系统微生物群落丰富度和多样性高于 R1. 二者微生物群属大多集中在变形菌门 (Proteobacteria), 纲水平上优势菌属为 β -变形菌纲 (β -Proteobacteria). 但在属水平上具体种群丰度结构有较大差异, 亚硝酸盐间歇生成减弱浓度抑制的同时富集了更多 DPAOs 菌属 (*Dechloromonas* 和 *Pseudomonas*), 与 *Nitrosomonas* 共同作用使短程硝化与反硝化除磷可达到动态平衡, 实现系统稳定运行.

参考文献:

- [1] Du S M, Yu D S, Zhao J, et al. Achieving deep-level nutrient removal via combined denitrifying phosphorus removal and simultaneous partial nitrification-endogenous denitrification process in a single-sludge sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **289**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121690.
- [2] 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 等. DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 791-798.
- [3] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, et al. A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors [J]. *Water Research*, 2003, **37**(14): 3463-3471.
- [4] Zeng W, Li L, Yang Y Y, et al. Nitrification and denitrification of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A²O) process at ambient temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8074-8082.
- [5] 宋姬晨, 王淑莹, 杨雄, 等. 亚硝酸盐对 A²O 系统脱氮除磷的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(9): 2231-2238.
- [6] Song J C, Wang S Y, Yang X, et al. Effect of nitrite on nutrient removal in A²O system [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(9): 2231-2238.
- [7] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences-An application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [8] 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. 100-124.
- [9] Zhang W B, Zhang Z M, Wang Y, et al. Effect of turfgrass establishment on soil microbiota using Illumina sequencing [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2017, **16**(3): 679-686.
- [10] 马娟, 杨蕊春, 俞小军, 等. CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1375-1381.
- [11] Ma J, Yang R C, Yu X J, et al. Realization of short-cut nitrification in a CAST process at high temperature and its phosphorus removal performance [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1375-1381.
- [12] 康婷婷, 王亮, 何洋洋, 等. 亚硝酸盐型反硝化除磷工艺特性及其应用 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1705-1714.
- [13] Kang T T, Wang L, He Y Y, et al. The performance of DPAO using nitrite as electron acceptor and its practical application [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1705-1714.
- [14] 张杰, 劳会妹, 李冬, 等. 不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5097-5105.
- [15] Zhang J, Lao H M, Li D, et al. Effect of different ratios of anaerobic time and aeration time on the operation of a continuous-flow reactor with partial nitrification granules [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5097-5105.
- [16] 李冬, 刘博, 王文琪, 等. 污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5048-5056.
- [17] Li D, Liu B, Wang W Q, et al. Effects of solid retention time on the phosphorus removal and nitrosation granules system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5048-5056.
- [18] Rubio-Rincón F J, Lopez-Vazquez C M, Welles L, et al. Cooperation between *Candidatus* competibacter and *Candidatus* accumulibacter clade I, in denitrification and phosphate removal processes [J]. *Water Research*, 2017, **120**: 156-164.
- [19] 李冬, 刘博, 王文琪, 等. 除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 867-875.
- [20] Li D, Liu B, Wang W Q, et al. Simultaneous short-cut nitrification-denitrification phosphorus removal granules induced by phosphorus removal granules [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 867-875.
- [21] 宋姬晨, 王淑莹, 杨雄, 等. 缺/好氧条件下亚硝酸盐的存在

- 对污泥沉降性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(4): 1361-1368.
- Song J C, Wang S Y, Yang X, *et al.* Influence of nitrite on sludge settleability under anoxic and aerobic conditions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(4): 1361-1368.
- [16] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Potential cause of aerobic granular sludge breakdown at high organic loading rates [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **85**(5): 1601-1610.
- [17] 袁强军, 张宏星, 陈芳媛. 不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4661-4668.
- Yuan Q J, Zhang H X, Chen F Y. Long-term stability of aerobic granular sludge under low carbon to nitrogen ratio [J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4661-4668.
- [18] Rubio-Rincón F J, Weissbrodt D G, Lopez-Vazquez C M, *et al.* “*Candidatus Accumulibacter delftensis*”: a clade IC novel polyphosphate-accumulating organism without denitrifying activity on nitrate[J]. Water Research, 2019, **161**: 136-151.
- [19] de Sousa Rollemberg S L, Mendes Barros A R, Milen Firmino P I, *et al.* Aerobic granular sludge: cultivation parameters and removal mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2018, **270**: 678-688.
- [20] 刘煜, 方茜, 徐诗燕, 等. 同步亚硝化/反硝化除磷的调控因子及菌群分析[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(5): 27-33.
- Liu Y, Fang Q, Xu S Y, *et al.* Control factors of simultaneous nitrification/denitrification phosphorus removal and analysis of flora [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(5): 27-33.
- [21] He Q L, Chen L, Zhang S J, *et al.* Hydrodynamic shear force shaped the microbial community and function in the aerobic granular sequencing batch reactors for low carbon to nitrogen (C/N) municipal wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2019, **271**: 48-58.
- [22] Du S M, Yu D S, Zhao J, *et al.* Achieving deep-level nutrient removal via combined denitrifying phosphorus removal and simultaneous partial nitrification-endogenous denitrification process in a single-sludge sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2019, **289**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121690.
- [23] Saito T, Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms [J]. Water Research, 2004, **38**(17): 3760-3768.
- [24] Luo J H, Hao T W, Wei L, *et al.* Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge [J]. Water Research, 2014, **62**: 127-135.
- [25] de Graaff D R, van Loosdrecht M C M, Pronk M. Stable granulation of seawater-adapted aerobic granular sludge with filamentous *Thiothrix* bacteria [J]. Water Research, 2020, **175**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115683.
- [26] Li S, Li D, Zhang S R, *et al.* Effect of aeration modes on simultaneous nitrogen and phosphorus removal and microbial community in a continuous flow reactor with granules [J]. Bioresource Technology, 2019, **294**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122154.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-nui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-hang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)