

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



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响

崔有为¹, 金常林¹, 王好韩¹, 李晶²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 中国航空规划设计研究总院有限公司, 北京 100120)

摘要: 好氧/缺氧-盛宴/饥饿(O/A-F/F)选择模式能够在好氧段实现活性污泥积累内源聚合物的同时在缺氧段原位利用内源聚合物驱动反硝化。为了深入探究不同的碳源类型对O/A-F/F模式下内源聚合物积累和内源反硝化的影响, 实验以乙酸和葡萄糖为主要碳源探究内源聚合物积累和内源反硝化特性以及富集的活性污泥菌群的结构和功能。结果表明, 在O/A-F/F选择模式下, 当进水化学需氧量(COD)为500 mg·L⁻¹左右时, 以乙酸为主要碳源系统(Ac-SBR)和以葡萄糖为主要碳源的系统(Gc-SBR)均能实现40 mg·L⁻¹的硝酸盐氮的内源去除, 且各系统均实现了部分短程反硝化。但Ac-SBR实现了更高的亚硝酸盐的积累。乙酸有利于内源聚羟基脂肪酸酯(PHA)积累并驱动内源反硝化过程, PHA产率为0.52, 平均反硝化速率(DNR)为9.65 mg·(L·h)⁻¹。Gc-SBR系统能够实现PHA和糖原(Gly)的同时积累, 但Gly产率高于PHA产率, 分别为0.36和0.17, DNR为4.35 mg·(L·h)⁻¹。Gly是实现内源反硝化过程的主要驱动力, 反硝化脱氮贡献率占总量的77%。16S rRNA高通量测序表明Proteobacteria门中的 β -Proteobacteria在Ac-SBR中为优势菌纲, 菌群丰度为40.56%, 而在Gc-SBR中菌群丰度为18.05%。 α -Proteobacteria可能在Gc-SBR中贡献了微生物的糖原积累。 β -Proteobacteria、Unclassified Bacteroidetes和Lgnavibacteria在Ac-SBR中贡献了内源PHA积累。

关键词: 好氧/缺氧-盛宴/饥饿模式(O/A-F/F); 乙酸; 葡萄糖; 内源聚合物积累; 内源反硝化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0336-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806099

Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode

CUI You-wei¹, JIN Chang-lin¹, WANG Hao-han¹, LI Jing²

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: To accumulate endogenous polymers during the aerobic phase, the aerobic/anoxic-feast/famine (O/A-F/F) selection mode can be used. It can also be used *in situ* for endogenous denitrification by activated sludge during the anoxic phase. To further explore the effect of carbon sources on the activated sludge accumulation of endogenous polymers and endogenous denitrification, this study used acetic and glucose as the main carbon sources to investigate the accumulation of endogenous polymers, endogenous denitrification, and the structure and function of enriched activated sludge. The results show that acetic (Ac-SBR) and glucose (Gc-SBR) as the main carbon source systems achieved a 40 mg·L⁻¹ nitrate removal by endogenous denitrification when the influent chemical oxygen demand (COD) was ~500 mg·L⁻¹ in the O/A-F/F selection mode. Both the Ac-SBR and Gc-SBR achieved partial denitrification, but the nitrite accumulation of the Ac-SBR was higher than that of the Gc-SBR. Acetic is favorable for the accumulation of endogenous polyhydroxyalkanoate (PHA); PHA drives the endogenous denitrification. The yield of PHA was 0.52 and the denitrification rate (DNR) was 9.65 mg·(L·h)⁻¹. The Gc-SBR system achieved the simultaneous accumulation of PHA and glycogen (Gly). The yield of Gly was higher than that of PHA and the DNR driven by Gly was 4.35 mg·(L·h)⁻¹. The Gly was the main driving force to achieve endogenous denitrification and contributed to 77% of the total nitrogen removal. The 16S rRNA high-throughput sequencing analysis of activated sludge flora shows that the class of β -Proteobacteria in the Proteobacteria was dominant, with an abundance of 40.56% in the Ac-SBR. However, the abundance of β -Proteobacteria was only 18.05% in the Gc-SBR. The class of α -Proteobacteria contributes to glycogen accumulation in the Gc-SBR. The PHA can be accumulated by β -Proteobacteria, Unclassified Bacteroidetes, and Lgnavibacteria in the Ac-SBR.

Key words: aerobic/anoxic-feast/famine (O/A-F/F); acetic; glucose; endogenous polymers accumulation; endogenous denitrification

内源反硝化工艺^[1~3]是污水处理中广泛应用的生物脱氮工艺, 该工艺具有节省碳源, 降低CO₂释放量和污泥产量, 提高系统脱氮能力的优点^[4]。内源反硝化脱氮能力取决于内源聚合物的积累量^[4], 因此如何将污水中有机物最大效率地转化为内源积累物是关键。盛宴饥饿选择机制(F/F)被报道是一种高效积累内源聚合物的方法^[5~8]。最近的研究表明在好氧/缺氧交替F/F选择模式(O/A-F/F)下活

性污泥能迁移外源有机物转换为内源聚合物并在缺氧段实现内源反硝化脱氮^[9], 这为实现在好氧条件下迁移有机物进入到缺氧进行反硝化提供了理论保障。微生物的内源积累受外源碳类型的影响, 同时碳源类型影响了微生物菌群结构和功能, 从而影响

收稿日期: 2018-06-11; 修订日期: 2018-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478011)

作者简介: 崔有为(1977~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污水处理新技术, E-mail: cyw@bjut.edu.cn

内源反硝化脱氮效果^[10, 11]。但是, O/A-F/F 选择模式下碳源对内源聚合物的积累和内源反硝化的影响研究还未见报道。为了更好地理解内源聚合物的积累及内源反硝化脱氮, 本研究采用乙酸和葡萄糖为两种主要碳源, 在 O/A-F/F 模式下探究它们对内源聚合物积累和内源反硝化的影响, 从生物功能和生物组成层面比较了微生物的特性。碳源的影响探究有利于更好地实现各类废水内源聚合物的积累及内源反硝化脱氮。

1 材料与方法

1.1 废水和接种污泥

实验采用北京工业大学家属楼的生活污水作为实验用水, 生活污水经过化粪池处理。生活污水水质指标如表 1 所示。在生活污水中投加乙酸钠或葡萄糖使进水后反应器内初始 COD 浓度在 500 mg·L⁻¹ 左右, 乙酸和葡萄糖分别在各自系统中的 COD 占比为 80% 左右。实验污泥取自北京某污水处理厂。活性污

泥 COD 的去除, 硝化, 脱氮性能良好。两个实验反应器接种污泥浓度均在 3 000 mg·L⁻¹ 左右。

1.2 反应器的运行

实验采用 2 个相同的序批式生物反应器 (SBR), 分别为以乙酸为主要碳源的 SBR (Ac-SBR) 和以葡萄糖为主要碳源的 SBR (Gc-SBR), SBR 有效容积 8 L。控制好氧和缺氧时间使 F/F = 0.1。由于好氧段硝化不足, 在缺氧段投加 0.289 g 硝酸钾来维持缺氧环境。各 SBR 周期运行包括进水 5 min, 盛宴 (好氧) 期和饥饿期 (缺氧) 根据动态调整。好氧盛宴段时间采用监控溶解氧 (DO) 跃升高于 3 mg·L⁻¹ 作为曝气结束的信号。好氧结束后开始缺氧搅拌, 以 F/F = 0.1 确定缺氧时间。沉淀 1 h, 排水 5 min, 闲置 1 h。每天运行 2 个周期, 排水比为 0.5, 污泥龄 (SRT) 20d, 温度控制在 (28 ± 2) °C。活性污泥经过 O/A-F/F 选择模式连续运行 3 个 SRT 选择富集后, 连续运行数据作为有效数据进行比较分析。

表 1 生活污水水质条件

Table 1 Quality of the sewage wastewater

指标	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	TN
浓度/mg·L ⁻¹	162 ~ 235	41.2 ~ 75.4	<1	<1	5.5 ~ 8.8	70 ~ 82

1.3 计算

(1) 比基质摄取速率

$$q_s = \frac{\Delta \text{COD}}{\text{VSS} \cdot \Delta t} \quad (1)$$

式中, ΔCOD 为外源基质降解量, mg·L⁻¹; Δt 为缺氧反硝化时间, h; VSS 为污泥浓度, g·L⁻¹; q_s 为比基质的摄取速率 (以 COD/VSS 计), mg·(h·g)⁻¹。

(2) 污泥中 PHA 质量分数

$$\text{PHA}_{\text{胞内}} = \frac{\text{PHA}_{\text{污泥}}}{\text{VSS}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, PHA 为胞内 PHA 单位细胞质量分数, %; $\text{PHA}_{\text{污泥}}$ 为称取污泥中 PHA 质量, mg; VSS 为称取的污泥质量, mg。

(3) 系统污泥中 PHA 的浓度

$$\text{PHA} = \text{VSS} \times \text{PHA}_{\text{胞内}} \times 0.0465 \quad (3)$$

式中, PHA 为碳浓度, mmol·L⁻¹。

(4) 污泥中 Gly 的质量分数

$$\text{Gly}_{\text{胞内}} = \frac{\text{Gly}_{\text{污泥}}}{\text{VSS}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\text{Gly}_{\text{胞内}}$ 为胞内 Gly 单位细胞干重的质量分数, %; $\text{Gly}_{\text{污泥}}$ 为称取污泥中的 Gly 质量, mg。

(5) 污泥中的 Gly 浓度

$$\text{Gly} = \text{VSS} \times \text{Gly}_{\text{胞内}} \times 0.0333 \quad (5)$$

式中, Gly 为碳浓度, mmol·L⁻¹。

(6) 缺氧饥饿阶段的内源消耗速率

$$r_p = \frac{\Delta \text{Polymer}^1}{\Delta t} \quad (6)$$

式中, $\Delta \text{Polymer}^1$ 为内源 PHA 和 Gly 的碳总浓度产量, mmol·L⁻¹; Δt 为缺氧反硝化时间, h; r_p 为内源消耗速率, mmol·(L·h)⁻¹。

(7) 反硝化速率

$$\text{DNR} = \frac{\Delta \text{NO}_x^- - \text{N}}{\Delta t} \quad (7)$$

式中, $\Delta \text{NO}_x^- - \text{N}$ 为缺氧反硝化去除的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度 ($\text{NO}_x^- - \text{N} = \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$), mg·L⁻¹; Δt 为缺氧反硝化时间, h; DNR 为反硝化脱氮速率, mg·(h·L)⁻¹。

(8) 内源聚合物产率

$$Y = \frac{\Delta \text{Polymer}^2}{\Delta S} \quad (8)$$

式中, Y 为 Ac-SBR 或 Gc-SBR 中 PHA 或 Gly 产率; $\Delta \text{Polymer}^2$ 为 PHA 或 Gly 碳浓度产量, mmol·L⁻¹; ΔS 为外源基质降解碳浓度, mmol·L⁻¹。

VSS、PHA 和 Gly 的分子式分别是 $\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$ ^[12]、 $\text{CH}_{1.5}\text{O}_{0.5}$ ^[13] 和 CH_2O 。VSS、PHA

和 Gly 以每碳摩尔计时的相对分子质量分别是 24.6、21.5 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。

1.4 分析方法

根据国标法^[14]对 COD、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 MLVSS 进行检测。PHA 检测成分包含聚- β -羟基丁酸(PHB)和聚- β -羟基戊酸(PHV)。PHA 测量采用内标法进行气相色谱分析^[15]。Gly 测量采用蒽酮法^[16]。

1.5 微生物群体分析

实验中采集了 Ac-SBR 和 Gc-SBR 两种碳源条件下驯化稳定的活性污泥(连续运行 60 d 以后),污泥样品在 -20°C 保存。使用 E. Z. N. A.® 固体 DNA 试剂盒(Omega Bi-TEK, Norcross, GA, 美国)从样品中提取微生物 DNA,随后采用扩增细菌 16S 核糖体 RNA 基因的 V4-V5 区且带条形码的引物经 PCR 扩增。每个样品设 3 个平行样,将对应的 3 个 PCR 扩增产物混匀为 1 个样本;胶回收阳性克隆条带用 Tris 盐酸进行洗脱,根据 2.0% 琼脂糖电泳对各阳性胶回收产物的初步定量结果,采用蓝色荧光定量系统(QuantiFluor™-ST, Promega, 美国)定量检测待测样 PCR 产物后,将各待测样的 PCR 产物根据测序量要求进行混合。根据标准方案,在 Illumina MiSeq 平台上将纯化扩增子整合^[17,18]。原

始序列被保存到 NCBI 数据库,存档序列为 SRP2905300。

2 结果与讨论

2.1 Ac-SBR 和 Gc-SBR 周期反应比较

通过驯化活性污泥,系统达到了稳定状态。图 1 分别是以乙酸为主要碳源和以葡萄糖为主要碳源时各系统的周期动态变化。外源有机碳源在 1 h 左右的好氧盛宴期被利用,Ac-SBR 和 Gc-SBR 的 q_s 分别为 $342 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 和 $151 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 。 q_s 的差异主要是由于 Ac-SBR 和 Gc-SBR 中不同 VSS 导致的。Ac-SBR 的 VSS 为 $1221 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 Gc-SBR 的 VSS 为 $2990 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。伴随着外源有机质的消耗,内源聚合物逐渐增加。Ac-SBR 和 Gc-SBR 的内源积累碳浓度分别为 $6.14 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在缺氧饥饿期,伴随着内源的降解,缺氧段初期投加的 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_3^- -N 几乎被完全去除,外源 COD 缺氧段保持不变,表明反硝化碳源来自内源聚合物。Ac-SBR 在缺氧段前 4 h 基本完成大部分 NO_3^- -N 的去除, r_p 为 $1.55 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,DNR 为 $9.65 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。Gc-SBR 对 NO_3^- -N 的去除较慢, r_p 为 $0.86 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,DNR 为 $4.35 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

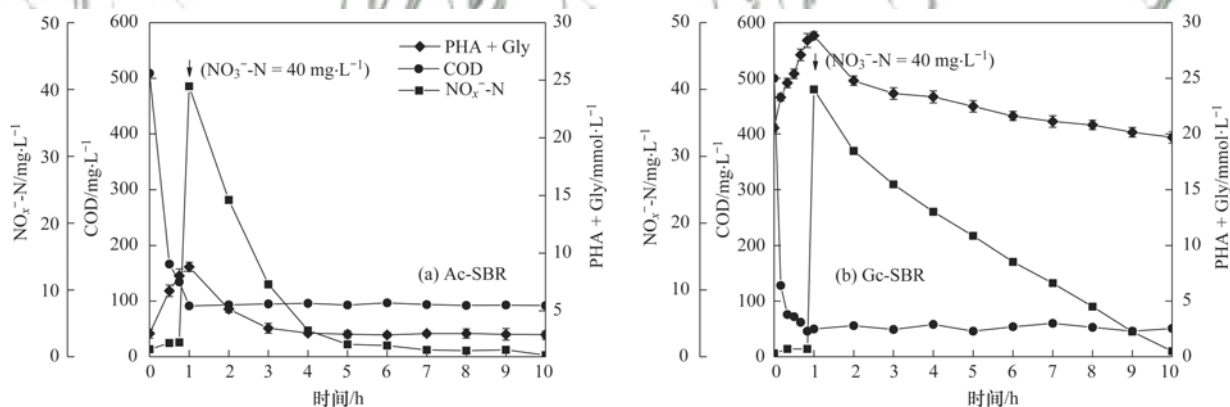


图 1 Ac-SBR 和 Gc-SBR 的周期动态变化

Fig. 1 Dynamic change of the Ac-SBR and Gc-SBR per cycle

2.2 碳源对内源聚合物积累的影响

内源 PHA 和 Gly 的细胞含量的周期变化过程见图 2。在 Ac-SBR 系统中,PHA 在好氧盛宴期大量积累,在缺氧段被消耗,但是周期内 Gly 含量没有明显变化。这说明 Gly 并未积累和参与内源反硝化脱氮过程。但是,在 Gc-SBR 系统中,PHA 和 Gly 在好氧盛宴期均大量积累,且在缺氧段均被消耗。值得关注的是,缺氧反硝化过程中,内源 PHA 在缺氧前 1 h 内优先被消耗降低至最低水平,该过程去除了 33% 的 NO_3^- -N。而后胞内 Gly 继续降解用于反硝化脱氮过程。由于 Gly 积累含量较高,以 Gly 为

内碳源将剩余的 77% NO_3^- -N 反硝化去除。

通过对 30 个稳定周期的最大 PHA 和 Gly 积累细胞干重含量($\text{PHA}_{\max}$ 和 $\text{Gly}_{\max}$)和产率(Y_{PHA} 和 Y_{Gly})的统计分析发现,在 Ac-SBR 系统中[图 3(a)], $\text{PHA}_{\max}$ 为 $14.01\% \pm 1.02\%$, Y_{PHA} 为 0.52 ± 0.03 ,而在 Gc-SBR 系统中[图 3(b)], $\text{PHA}_{\max}$ 为 $2.32\% \pm 0.51\%$, Y_{PHA} 为 0.17 ± 0.03 。在 Ac-SBR 系统中, $\text{Gly}_{\max}$ 为 $5.52\% \pm 0.04\%$, Y_{Gly} 几乎为 0。在 Gc-SBR 系统中, $\text{Gly}_{\max}$ 为 $24.98\% \pm 1.05\%$, Y_{Gly} 为 0.36 ± 0.04 , Y_{Gly} 是 Y_{PHA} 的 2.11 倍。Gc-SBR 系统中 $\text{Gly}_{\max}$ 是导致胞内聚合物 PHA 和 Gly 总内源积累

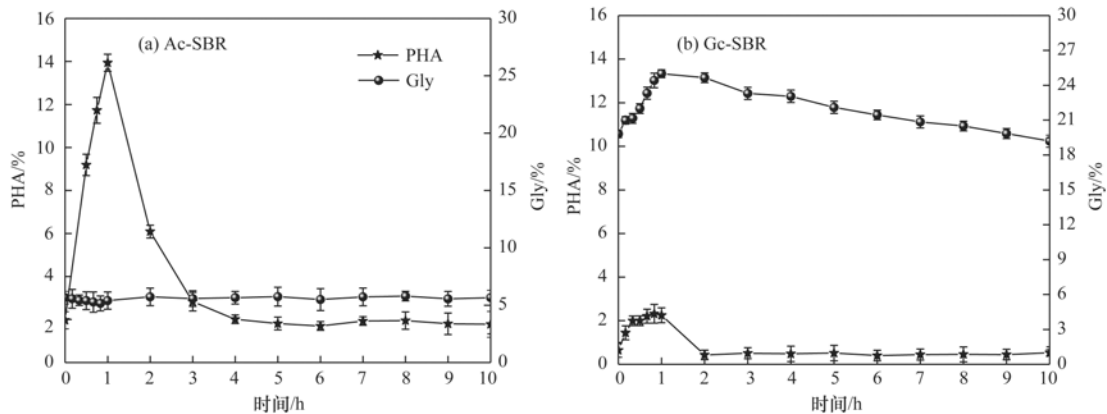


图2 Ac-SBR 和 Gc-SBR 的周期 PHA 和 Gly 动态变化

Fig. 2 PHA and Gly dynamic change of Ac-SBR and Gc-SBR per cycle

量基数 ($>20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著高于 Ac-SBR 系统 ($<10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的主要原因 (图 1). 前人研究表明, F/F 机制下乙酸做碳源有利于 PHA 的积累^[19~21],

而在以葡萄糖为碳源时微生物积累 Gly^[22]. 在以葡萄糖为主要碳源的废水中, 更多的碳源用于糖原的积累导致 PHA 积累能力低^[23].

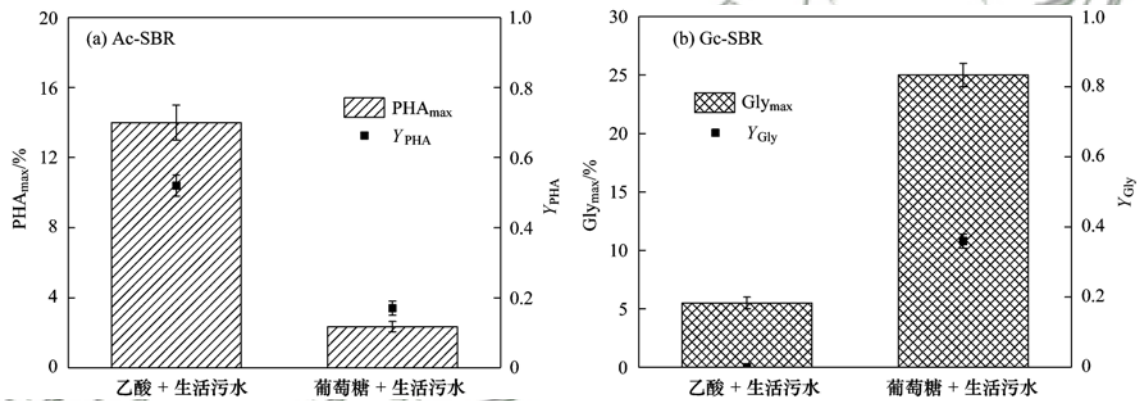


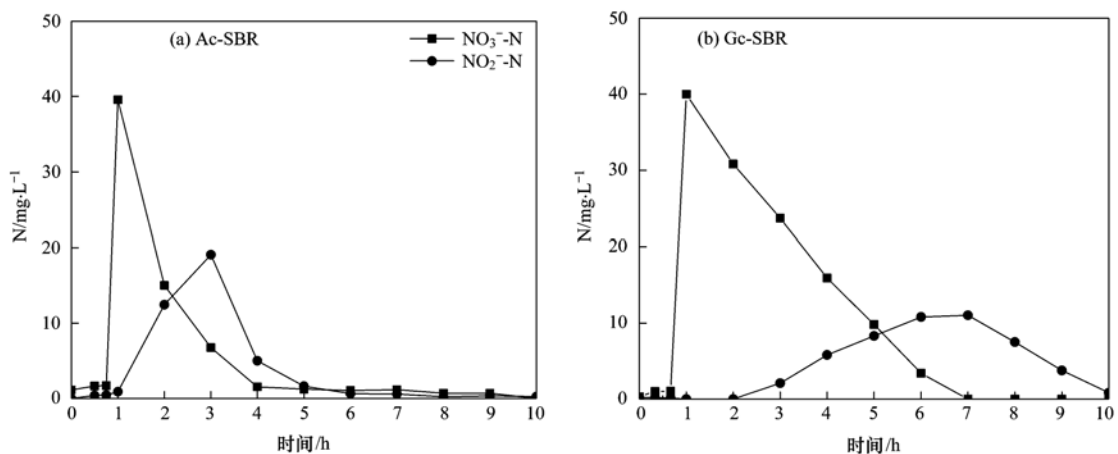
图3 Ac-SBR 和 Gc-SBR 的 PHA 和 Gly 最大细胞干重和产率

Fig. 3 PHA and Gly maximum dry cell weight and yield for Ac-SBR and Gc-SBR

2.3 碳源对内源反硝化的影响

传统反硝化过程难以实现 NO_2^- -N 的积累^[24], 有研究指出短程反硝化将 NO_3^- -N 首先还原为 NO_2^- -N, 再将 NO_2^- -N 还原为 N_2 , 有利于与厌氧氨氧化工艺结合降低能耗^[25]. Ac-SBR 和 Gc-SBR 系统

内源反硝化过程均出现 NO_2^- -N 积累 (图 4). Ac-SBR 系统中 NO_2^- -N 积累达到 $19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 积累率为 47.5%. Gc-SBR 系统 NO_2^- -N 积累达 $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 积累率为 27.5%. 本研究表明内源反硝化在 O/A-F/F 选择模式下有利于实现 NO_2^- -N 的积累, 乙

图4 Ac-SBR 和 Gc-SBR 周期 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的反硝化去除Fig. 4 NO_3^- -N and NO_2^- -N denitrification nitrogen removal for Ac-SBR and Gc-SBR per cycle

酸较葡萄糖更有利于 NO_2^- -N的积累. 这可能是由于在 Ac-SBR 系统中硝酸盐还原酶相比亚硝酸盐还原酶竞争电子受体 NO_3^- -N的能力更强, 从而导致了更多的 NO_2^- -N积累^[26]. 本研究同时发现, 在进水 COD 和进水 NO_3^- -N浓度等条件相同时, 在以乙酸为碳源启动内源反硝化过程中反硝化脱氮速率快. 表明 PHA 在反硝化脱氮过程中可能更容易被利用, 而 Gly 不易被降解. Zhu 等^[13]的研究也发现, 内源反硝化脱氮过程中内源 PHA 被优先降解, PHA 被降解至最低水平后 Gly 开始降解, 与本研究结果一致.

2.4 碳源对微生物菌群影响

对 Ac-SBR 和 Gc-SBR 驯化泥样进行 16S rRNA MiSeq 焦磷酸测序, 分析丰度 >1% 的种属. 在门水平比较两种碳源条件下的微生物(图 5), 本研究结果显示, Proteobacteria 菌门在 Ac-SBR 和 Gc-SBR 中均为优势菌群, 菌群丰度分别为 49.11% 和 28.99%. 有研究指出, Proteobacteria 菌门微生物具有一定的 PHA 积累能力^[27, 28]. TM7 为 Gc-SBR 中的优势菌群, 比例为 36.78%, 该菌属在 Ac-SBR 中未被发现, 葡萄糖对 TM7 丰度的增加有明显的促进作用. Bacteroidetes 在 Ac-SBR 和 Gc-SBR 中菌群丰度为 31.51% 和 16.40%. 研究认为 Bacteroidetes 菌门微生物具有积累 PHA 和反硝化脱氮功能^[29-31]. Chlorobi 在 Ac-SBR 和 Gc-SBR 中菌群丰度为 8.69% 和 1.54%. 此外, GN02、Lentisphaerae、Firmicutes、Spirochaetes 在 Ac-SBR 中菌群丰度为 2.85%、2.72%、2.39% 和 1.44%, 但 Gc-SBR 中菌群丰度均 <1%. Firmicutes 菌门微生物也具有

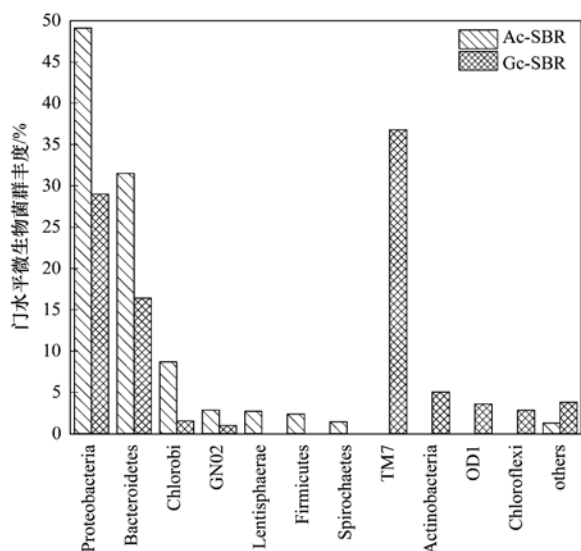


图 5 门水平比较 Ac-SBR 和 Gc-SBR 系统的种群结构

Fig. 5 Comparison of the Ac-SBR with the Gc-SBR microbial community structure at the phylum level

定的 PHA 积累能力^[27, 28]. Actinobacteria、OD1 和 Chloroflexi 在 Ac-SBR 中菌群丰度均 <1%, 但在 Gc-SBR 中菌群丰度为 5.05%、3.59% 和 2.84%.

在纲水平(图 6), Proteobacteria 门中的 β -Proteobacteria 在 Ac-SBR 中为优势菌纲, 菌群丰度为 40.56%, 而在 Gc-SBR 中菌群丰度仅为 18.05%. γ -Proteobacteria, α -Proteobacteria 和 δ -Proteobacteria 菌纲在 Ac-SBR 和 Gc-SBR 中分别为 2.89% 和 3.2%、1.72% 和 4.67% 及 1.02% 和 2.23%, 其中, α -Proteobacteria 被报道具有一定的糖原积累能力^[32]. Bacteroidetes 菌门中的 Unclassified Bacteroidetes 在 Ac-SBR 中菌群丰度为 13.21%, 远高于 Gc-SBR 中的丰度 3.75%. 在 Ac-SBR 中的 Saprospirae、Lgnavibacteria 和 Flavobacteriia 菌纲丰度高于 Gc-SBR, 分别为 10% 和 6.13%、8.52% 和 1.29% 及 2.63% 和低于 1%. Bacteroidia 菌纲在 Ac-SBR 和 Gc-SBR 丰度相似, 分别为 5.13% 和 5.93%. β -Proteobacteria、Unclassified Bacteroidetes 和 Lgnavibacteria 在 Ac-SBR 中的高丰度可能是其 PHA 积累量高于 Gc-SBR 系统生物学原因.

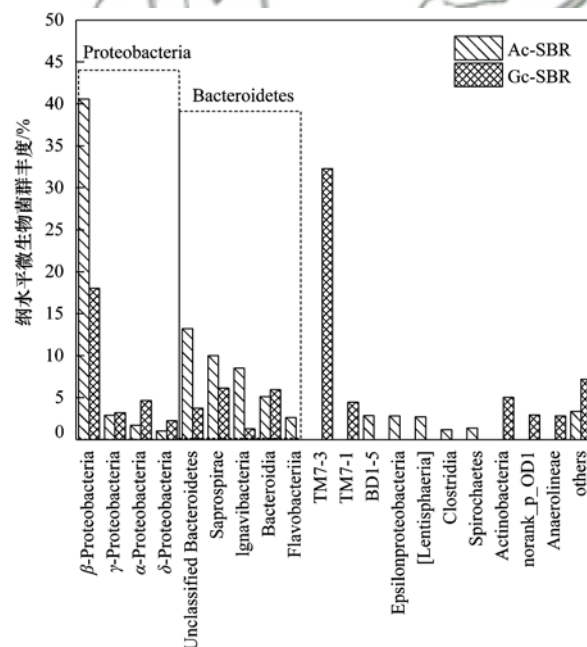


图 6 纲水平比较 Ac-SBR 和 Gc-SBR 系统的种群结构

Fig. 6 Comparison of the Ac-SBR with the Gc-SBR microbial community structure at the class level

3 结论

(1) 本研究表明 O/A-F/F 选择模式可以实现污水中有机物以内源积累的形式迁移到缺氧段进行内源反硝化. 乙酸促进 PHA 的积累, 葡萄糖有利于 Gly 的积累.

(2) 在 O/A-F/F 选择模式下碳源类型影响内源

反硝化过程和内源反硝化速率. 乙酸较葡萄糖作为碳源更有利于反硝化过程中 NO_2^- -N的积累, PHA 做为胞内碳源驱动内源反硝化的速率较 Gly 高.

(3) Gc-SBR 系统中 TM7 为优势菌属, α -Proteobacteria 可能是积累 Gly 的菌属. β -Proteobacteria、Unclassified Bacteroidetes 和 Lgnavibacteria 的高度富集是 Ac-SBR 中 PHA 积累量高于 Gc-SBR 的生物学原因.

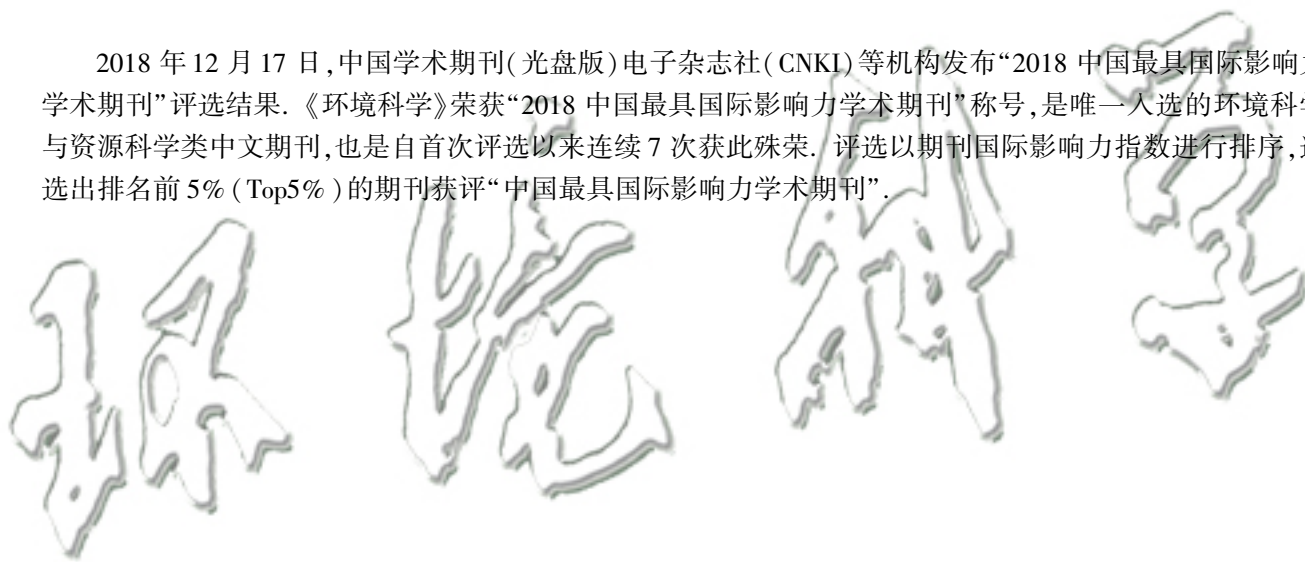
参考文献:

- [1] Morgan-Sagastume F, Heimersson S, Laera G, *et al.* Techno-environmental assessment of integrating polyhydroxyalkanoate (PHA) production with services of municipal wastewater treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **137**: 1368-1381.
- [2] Li Z M, Wang S Y, Zhang W T, *et al.* Nitrogen removal from medium-age landfill leachate via post-denitrification driven by PHAs and glycogen in a single sequencing batch reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **169**: 773-777.
- [3] Ciggin A S, Rossetti S, Majone M, *et al.* Extent of intracellular storage in single and dual substrate systems under pulse feeding[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20** (3): 1225-1238.
- [4] Krasnits E, Beliaevski M, Tarre S, *et al.* Storage-based denitrification with municipal wastewater: influence of the denitrification stage duration[J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(17): 2167-2175.
- [5] Albuquerque M G E, Concas S, Bengtsson S, *et al.* Mixed culture polyhydroxyalkanoates production from sugar molasses: The use of a 2-stage CSTR system for culture selection[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(18): 7112-7122.
- [6] Albuquerque M G E, Torres C A V, Reis M A M. Polyhydroxyalkanoate (PHA) production by a mixed microbial culture using sugar molasses: Effect of the influent substrate concentration on culture selection[J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3419-3433.
- [7] Pittmann T, Steinmetz H. Polyhydroxyalkanoate production as a side stream process on a municipal waste water treatment plant[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **167**: 297-302.
- [8] Moita R, Freches A, Lemos P C. Crude glycerol as feedstock for polyhydroxyalkanoates production by mixed microbial cultures[J]. *Water Research*, 2014, **58**: 9-20.
- [9] Chen H B, Yang Q, Li X M, *et al.* Post-anoxic denitrification via nitrite driven by PHB in feast-famine sequencing batch reactor[J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(10): 1349-1355.
- [10] Miao L, Wang S Y, Li B K, *et al.* Effect of carbon source type on intracellular stored polymers during endogenous denitrification (ED) treating landfill leachate[J]. *Water Research*, 2016, **100**: 405-412.
- [11] Albuquerque M G E, Martino V, Pollet E, *et al.* Mixed culture polyhydroxyalkanoate (PHA) production from volatile fatty acid (VFA)-rich streams: Effect of substrate composition and feeding regime on PHA productivity, composition and properties[J]. *Journal of Biotechnology*, 2011, **151**(1): 66-76.
- [12] Johnson K, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C M. Influence of the C/N ratio on the performance of polyhydroxybutyrate (PHB) producing sequencing batch reactors at short SRTs[J]. *Water Research*, 2010, **44**(7): 2141-2152.
- [13] Zhu R L, Wang S Y, Li J, *et al.* Biological nitrogen removal from landfill leachate using anaerobic-aerobic process: Denitrification via organics in raw leachate and intracellular storage polymers of microorganisms[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **128**: 401-408.
- [14] Eaton A D, Clesceri L S, Greenberg A E, *et al.* Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. New York: American Public Health Association, 1995.
- [15] Cui Y W, Zhang H Y, Lu P F, *et al.* Effects of carbon sources on the enrichment of halophilic polyhydroxyalkanoate-storing mixed microbial culture in an aerobic dynamic feeding process[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30766.
- [16] Zeng R J, Van Loosdrecht M C M, Yuan Z G, *et al.* Metabolic model for glycogen-accumulating organisms in anaerobic/aerobic activated sludge systems[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **81**(1): 92-105.
- [17] Cui Y W, Zhang H Y, Ding J R, *et al.* The effects of salinity on nitrification using halophilic nitrifiers in a Sequencing Batch Reactor treating hypersaline wastewater[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 24825.
- [18] Amato K R, Yeoman C J, Kent A, *et al.* Habitat degradation impacts black howler monkey (*Alouatta pigra*) gastrointestinal microbiomes[J]. *ISME Journal*, 2013, **7**(7): 1344-1353.
- [19] Johnson K, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C M. Influence of ammonium on the accumulation of polyhydroxybutyrate (PHB) in aerobic open mixed cultures[J]. *Journal of Biotechnology*, 2010, **147**(2): 73-79.
- [20] Beun J J, Paletta F, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Stoichiometry and kinetics of poly- β -hydroxybutyrate metabolism in aerobic, slow growing, activated sludge cultures[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2000, **67**(4): 379-389.
- [21] Dionisi D, Majone M, Tandoi V, *et al.* Sequencing batch reactor: Influence of periodic operation on performance of activated sludges in biological wastewater treatment[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, **40** (23): 5110-5119.
- [22] Shimada T, Zilles J, Raskin L, *et al.* Carbohydrate storage in anaerobic sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 2007, **41**(20): 4721-4729.
- [23] Pittmann T, Steinmetz H. Influence of operating conditions for volatile fatty acids enrichment as a first step for polyhydroxyalkanoate production on a municipal waste water treatment plant[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 270-276.
- [24] Du R, Cao S B, Niu M, *et al.* Performance of partial-denitrification process providing nitrite for anammox in sequencing batch reactor (SBR) and upflow sludge blanket (USB) reactor[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, **122**: 38-46.
- [25] Cao S B, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Achieving partial denitrification with sludge fermentation liquid as carbon source: The effect of seeding sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **149**: 570-574.
- [26] Ge S J, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Nitrite accumulation under constant temperature in anoxic denitrification process: The effects of carbon sources and COD/ NO_3^- -N[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 137-143.
- [27] Ince O, Basak B, Ince B K, *et al.* Effect of nitrogen deficiency during SBR operation on PHA storage and microbial diversity[J]. *Environmental Technology*, 2012, **33**(16): 1827-1837.
- [28] Venkateswar Reddy M, Venkata Mohan S. Effect of substrate load and nutrients concentration on the polyhydroxyalkanoates

- (PHA) production using mixed consortia through wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 573-582.
- [29] Langone M, Yan J, Haaijer S C M, *et al.* Coexistence of nitrifying, anammox and denitrifying bacteria in a sequencing batch reactor[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2014, **5**: 28.
- [30] Du R, Cao S B, Li B K, *et al.* Simultaneous domestic wastewater and nitrate sewage treatment by Denitrifying Ammonium Oxidation (DEAMOX) in sequencing batch reactor [J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 399-407.
- [31] Nakasaki K, Tran L T H, Idemoto Y, *et al.* Comparison of organic matter degradation and microbial community during thermophilic composting of two different types of anaerobic sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(2): 676-682.
- [32] Beer M, Kong Y H, Seviour R J. Are some putative glycogen accumulating organisms (GAO) in anaerobic; aerobic activated sludge systems members of the alpha-Proteobacteria? [J]. *Microbiology*, 2004, **150**(Pt 7): 2267-2275.

《环境科学》连续 7 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2018 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2018 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2018 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 7 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)