

· 创新与探索 ·

连续曝气 SBR 快速培养 AGS 及同步脱氮除碳特性分析

潘江^{1,2}, 肖芃颖¹, 姚源², 陈婷婷², 廖伟伶², 赵天涛¹, 封丽^{2,3*}, 赵春阳⁴

- (1. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054;
2. 重庆市生态环境科学研究院, 重庆市生态环境遥感监测大数据应用技术协同创新中心, 重庆 401147;
3. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 4. 重庆川仪环境科技有限公司, 重庆 401121)

摘要: 配制模拟生活污水, 利用序批式活性污泥法 (SBR) 反应器在连续曝气条件下进行好氧颗粒污泥 (AGS) 的培养, 研究完全好氧模式下 AGS 的快速培养及其同步脱氮除碳特性。结果表明: 污泥第 7 天即出现颗粒化, 平均粒径 0.32 mm, 连续曝气 SBR 中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、COD 的去除率分别为 95.3%、77.4%、97.5%; 高通量测序分析结果显示, 相较接种絮状污泥, 与颗粒化相关的丝状菌属、动胶菌属丰度显著提高, HN-AD 菌作为脱氮功能微生物, 其物种多样性也得以丰富。

关键词: 脱氮除碳; 连续曝气活性污泥法; 好氧颗粒污泥; 微生物多样性

中图分类号: X703

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2021)03-0060-04

Characteristic Analysis on Rapid Cultivation of AGS with Continuous Aeration SBR and Simultaneous Removal of Nitrogen and Carbon

PAN Jiang^{1,2}, XIAO Peng-ying¹, YAO Yuan², CHEN Ting-ting², LIAO Wei-ling², ZHAO Tian-tao¹,
FENG Li^{2,3*}, ZHAO Chun-yang⁴

- (1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Academy of Eco-Environmental Science, Chongqing Collaborative Innovation Center of Big Data Application in Eco-Environmental Remote Sensing, Chongqing 401147, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. Chongqing Chuanyi Environmental Technology Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: The characteristics of rapid cultivating of AGS in fully aerobic mode and simultaneous removal of nitrogen and carbon from simulated domestic sewage were studied by using sequencing batch reactor (SBR) for cultivating aerobic granular sludge (AGS) under continuous aeration conditions. The results showed that the sludge granulated on the 7th day, with an average particle size of 0.32 mm. The removal rate of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and COD in continuous aeration SBR were 95.3%, 77.4%, and 97.5%, respectively. High-throughput sequencing analysis results showed that compared with inoculated flocculent sludge, the abundance of *Meganema* and *Zoogloea* which related to granulation increased significantly. As denitrifying microorganism, the diversity of HN-AD bacteria was enriched.

Key words: Nitrogen and carbon removal; Continuous aeration SBR; Aerobic granular sludge; Microbial diversity

随着城镇化进程的加快, 污水排放量日益增加, 对水环境产生了巨大影响^[1]。好氧颗粒污泥 (AGS) 工艺因其良好的特质, 在各种废水处理中被应用^[2-3]。AGS 的形成主要受进水水质、水力剪切力、沉淀时间等因素影响。目前, AGS 培养主要采用加大选择压的传统策略^[4-6], 存在颗粒化时间长

收稿日期: 2020-04-11; 修订日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51708077); 重庆市科研院所绩效激励引导专项基金资助项目 (cstc2017jxj20003); 重庆理工大学研究生创新基金资助项目 (yex20192075)

作者简介: 潘江 (1994—), 男, 重庆人, 硕士, 研究方向为水污染控制工程。

* 通信作者: 封丽 E-mail: 17495028@qq.com

(一般 ≥ 30 d)的问题,而好氧模式对 AGS 快速形成有帮助^[7],这主要是由于反应器具有充足的好氧曝气时间形成高稳溶氧(DO)环境,保障充足的上升流速和水力剪切力,有助于颗粒污泥的形成。AGS 特殊的生物层结构使其具备同步脱氮除碳的功能^[8],其脱氮除碳效率受有机负荷、运行模式、颗粒粒径大小、DO 等因素的影响。合理控制 SBR 的好氧曝气强度及时间,将可能在完全好氧模式下达到 AGS 快速培养和高效同步脱氮除碳的目的,对推动 AGS 的工程化应用具有一定意义。

今启动连续曝气 SBR,研究完全好氧模式下 AGS 的快速培养及其同步脱氮除碳特性。通过检测过程中溶解氧(DO),污泥沉降性能指标(SVI),粒径,COD、NH₃-N、TN 去除效果及微生物群落,分析连续曝气 SBR 中 AGS 形成过程及脱氮除碳效率,并利用高通量测序手段于微生物角度分析关键菌群对污泥颗粒化、脱氮除碳性能的影响及作用。

1 材料与方 法

1.1 实验仪器与材料

接种泥饼取自城市污水处理厂脱水间,含水率为 85%,污泥颜色为黄褐色。实验装置设计基于 SBR 原理,反应器为圆柱形有机玻璃(内径 8 cm,高 70 cm),有效工作体积约 3 L,容积交换率为 50%。采用微孔式曝气,转子流量计调节维持反应器内曝气流量 4 L/min ~ 6 L/min,该曝气条件下,反应器内上升气流流速保持在 1.33 cm/s ~ 1.99 cm/s 之间。采用时间程序控制器(PLC)自动控制运行周期,每个周期(240 min)包括进水(10 min)、曝气(219 min)、沉淀(5 min)和排水(6 min)4 个运行阶段。通过内置加热棒维持反应器内水温为 20 ℃ ~ 25 ℃。

实验用水采用配制的模拟生活污水,以无水乙酸钠为碳源,以硫酸铵为氮源,以磷酸氢二钾为磷源,废水中 C:N:P 质量之比为 100:5:1。进水 COD 和 NH₃-N 分别控制为 500 mg/L 和 25 mg/L,微量元素溶液包括:CaCl₂ 0.1 g/L,NaHCO₃ 0.1 g/L,MgSO₄ 0.15 g/L,FeSO₄ 0.01 g/L,H₃BO₃ 0.05 mg/L,MnCl₂ 0.05 mg/L,CuSO₄ 0.05 mg/L,EDTA 0.05 mg/L。

1.2 分析指标及方法

水质指标:COD 采用快速消解分光光度法测定;NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法测定;TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定。污泥

浓度(MLSS)采用标准重量法测定,SVI₃₀ 为沉降 30 min 时的 SVI 值。DO 采用哈希 HQ-30d 型便携式溶氧仪测定,粒径分布采用美国 Microtrac 公司 S3500 型激光衍射仪测定。

采用扫描电镜(SEM)依据文献[9]方法处理样品后,送至武汉某检测公司进行颗粒表面结构扫描分析。用天根生化科技(北京)有限公司的细菌基因组 DNA 提取试剂盒提取样品的基因组 DNA,送至上海某生物医药科技公司高通量测序,分析微生物多样性。

2 结果与讨论

2.1 连续曝气 SBR 中 AGS 快速培养及颗粒结构特征分析

SBR 启动运行初期(第 1 天—第 10 天),反应器内 DO 保持在 4 mg/L ~ 6 mg/L 之间,为完全好氧环境。MLSS 由接种前的 4 822 mg/L 上升到 6 351 mg/L,此时 SVI 由 52.96 mL/g 短暂升到 78.02 mL/g 随后下降至 33.11 mL/g。结果表明,絮状污泥接种初期,微生物受基质、DO 等环境因素波动影响出现短时生长现象,而随着高 DO 带来的充足上升气流流速形成一定强度的水力剪切力,截留了沉降性能好的污泥,沉降性能差的污泥随出水排出,最终 MLSS、SVI 稳定在 3 496 mg/L、44.38 mL/g 水平。SBR 启动运行至第 7 天,直径范围 0.2 mm ~ 0.6 mm 的粒径占 60.34%,平均粒径 0.32 mm,污泥粒径分布呈单峰状,表明污泥已出现颗粒化且颗粒分选性较好;SBR 持续运行至第 43 天,直径范围 0.4 mm ~ 2 mm 的粒径占 67.79%,平均粒径 0.57 mm,颗粒成熟。连续曝气 SBR 的高稳 DO 环境(4 mg/L ~ 6 mg/L)保障了持续充足上升气流流速(1.33 cm/s ~ 1.99 cm/s),提供水力剪切力加快了初生颗粒的形成。

连续曝气 SBR 培养的成熟 AGS 颜色为淡黄色,颗粒间边界轮廓清晰、表面光滑,颗粒形态以椭圆为主。SEM 表征发现,颗粒表面布满空隙,有利于 DO 在颗粒内、外部层传输,为实现硝化、反硝化菌同时生长提供环境。颗粒表面主要附着球菌,同时可见少量丝状菌缠绕及黏液。丝状菌可为颗粒中的微生物生长提供骨架,加快 AGS 的形成^[10],附着的黏液通常被认为是细菌代谢分泌的胞外聚合物^[11],可增进污泥间的吸附及微生物自凝聚,促进颗粒形成。连续曝气 SBR 实验中,实现 AGS 的

快速培养,可能也与高 DO 环境促进某些与颗粒形成紧密相关的微生物生长有关。

2.2 连续曝气 SBR 的好氧同步脱氮除碳性能分析

反应器运行的第 1 天—第 10 天, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 COD 去除率分别为 98.7%、57.8% 和 97%, 反应器虽然具有良好的好氧氨氧化性能和 COD 去除效率,但 TN 去除率不高,反硝化性能一般。结合粒径结果分析可知,该阶段已形成初生颗粒,高 DO 快速激活了初生颗粒内部硝化菌活性,加快了好氧氨氧化反应速率。反应器运行的第 11 天—第 40 天, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 COD 去除率较前期保持稳定,反硝化性能仍未得到明显提升,该阶段颗粒已成熟。此后反应器继续运行至第 64 天, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 COD 去除率分别为 95.3%、77.4% 和 97.5%, TN 去除率较前期得到提升。上述结果说明, AGS 在成熟过程中,颗粒内部菌群结构及微生物活性受环境因素波动影响出现的变化,并不能及时反映在表征 SBR 性能的宏观出水指标上。当 AGS 成熟后,颗粒结构趋于稳定,反应器内的持续好氧环境可能增强了颗粒内部一些具有好氧反硝化功能微生物的活性,提高了 TN 去除率,进而实现完全好氧条件下的同步脱氮除碳。

2.3 连续曝气 SBR 的微生物多样性分析

对接种污泥(S1)和 AGS(S2)样品进行高通量测序分析,探究连续曝气 SBR 的微生物多样性特征,结果见表 1。由表 1 可知,在 S1、S2 分别测得 OTU 数量 294 个、104 个,覆盖指数 $\geq 99.90\%$,表明对所有样品抽样完全,能够真实反映样品中微生物群落的情况。S2 的 Shannon 指数值低于 S1,说明 SBR 高稳 DO 条件在促进 AGS 形成和成熟过程中,可能增强了某些功能菌群的选择性竞争,致使其群落分布没有絮状污泥时期均匀。同时,S2 中更高的 Simpson 指数也说明高氧环境降低了 AGS 内部微生物的多样性。Chao 和 Ace 指数结果表明

S2 的微生物丰富度远低于 S1,这可能归因于连续曝气 SBR 促进了 AGS 内部某些适宜在高氧环境生长的微生物的富集。

接种污泥 S1 中优势菌属主要为假单胞菌属 (*Pseudomonas*) (49.42%),经连续曝气 SBR 培养后,好氧颗粒污泥 S2 中优势菌属为丝状菌属 (*Meganema*) (64.98%),其相对丰度显著增加(涨幅近 500%)。*Meganema* 不仅有利于菌团骨架形成进而强化悬浮微生物的附着^[12],其自身还具有反硝化功能^[13]。S2 中动胶菌属 (*Zoogloea*) 是仅次于 *Meganema* 的第二高丰度菌属,其在 S1 中未检出,在 S2 中达到 16.19%。*Zoogloea* 不仅具有氧化分解有机物功能,还能分泌大量胞外聚合物促进絮状污泥自凝聚^[14]。上述两种菌属在好氧条件中得到富集,这一多样性结果与成熟 AGS 的 SEM 表征分析结果一致。因此,连续曝气 SBR 具备的稳定高氧环境促进了与颗粒化紧密关联的 *Meganema* 和 *Zoogloea* 高丰度富集,有助于污泥在完全好氧模式下快速颗粒化。

S1 中优势菌属为 *Pseudomonas*,属于异养硝化—好氧反硝化 (HN-AD) 菌。污泥颗粒化前后, *Pseudomonas* 丰度由 49.42% 大幅降至 0.5%,这主要是由于 *Pseudomonas* 偏好在低 DO 范围 (0.35 mg/L ~ 1 mg/L) 生长^[15]。接种污泥来自污水处理厂,DO 变化大,而实验中接种污泥后续是在稳定高 DO 条件下进行颗粒化培养,可能导致 *Pseudomonas* 流失。尽管如此,颗粒培养过程中,其余同样具有 HN-AD 功能的菌群物种多样性得以丰富。相比 S1,更利于在高氧环境下生长的黄杆菌属 (*Flavobacterium*) (10.42%)、陶厄氏菌属 (*Thauera*) (2.1%)、不动杆菌属 (*Acinetobacter*) (0.4%) 相对丰度在 S2 中均明显增长。因此,连续曝气 SBR 的完全好氧环境同时促进了与污泥颗粒化、好氧同步硝化—反硝化紧密关联的菌群富集,对反应器实现高效同步脱氮除碳性能具有重要作用。

表 1 样品微生物 Alpha 多样性结果

Table 1 Alpha diversity index of microorganisms in the samples

| 样品 | OTU 数 $n/\text{个}$ | 丰富度 | | | 多样性 | |
|-----------|--------------------|--------|--------|---------|------------|------------|
| | | 覆盖指数 | Ace 指数 | Chao 指数 | Shannon 指数 | Simpson 指数 |
| S1 (接种污泥) | 294 | 99.90% | 327.63 | 324.00 | 2.91 | 0.25 |
| S2 (AGS) | 104 | 99.92% | 143.96 | 140.25 | 1.29 | 0.46 |

3 结语

采用连续曝气 SBR 反应器,污泥第 7 天即出

现颗粒化,平均粒径为 0.32 mm,形成颗粒污泥对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 COD 具有良好的脱氮除碳性能,且连续曝气 SBR 提供的环境有助于不同功能菌群的优势富集,实现反应器好氧同步脱氮除碳。综上所述,该反应器不仅可以实现污泥快速颗粒化,还能实现对污染物的良好去除,在污水处理领域具有一定实用价值。

[参考文献]

- [1] 赵宗权,焦树林,曹玉平,等. 快速城市化背景下的思雅河流域水环境分析[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(2):22-26.
- [2] 耿冲冲,王亚军. 污水中抗生素生化去除研究进展[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(3):12-16,56.
- [3] 詹小波,郭珍,贺鹏. 工业园区水污染源精细化管控系统的应用[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(2):5-7.
- [4] RANIA A H, OLIVER T I, MOHAMED S Z, et al. Rapid formation and characterization of aerobic granules in pilot-scale sequential batch reactor for high-strength organic wastewater treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, 22: 27-33.
- [5] WAN C, LEE D J, YANG X, et al. Calcium precipitate induced aerobic granulation [J]. Bioresource Technology, 2015, 176: 32-37.
- [6] 由阳,彭轶,袁志国,等. 富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养

与特性[J]. 环境科学,2008,29(8):164-170.

- [7] 杨延栋. 不同运行方式下好氧颗粒污泥处理生活污水[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [8] 赵永贵,黄钧,杨华. 高碳氮负荷下同时脱氮除碳好氧颗粒污泥研究[J]. 环境科学,2011,32(11):272-278.
- [9] 符波,廖潇逸,丁丽丽,等. 环境扫描电镜对废水生物样品形态结构的表征研究[J]. 中国环境科学,2010,30(1):93-98.
- [10] 刘玉玲,高升,白凯. 好氧颗粒污泥形成过程与机理分析[J]. 环境科学与技术,2012(9):132-135.
- [11] 金睿男,王小雨,林雪,等. 胞外聚合物及其对重金属吸附作用的研究进展[J]. 工业水处理,2019,39(1):8-13.
- [12] 金正宇,郝皓,苑泉,等. 进水模式对强化脱氮好氧颗粒污泥培养的影响[J]. 中国环境科学,2018,38(3):935-942.
- [13] KRAGELUND C, NIELSEN J L, THOMSEN T R, et al. Ecophysiology of the filamentous *Alphaproteobacterium Meganema* perideroedes in activated sludge [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2005, 54(1):111-112.
- [14] 姚源,竺建荣,唐敏,等. 好氧颗粒污泥技术处理乡镇污水应用[J]. 环境科学研究,2018,31(2):379-388.
- [15] MA W W, HAN Y X, MA W C, et al. Enhanced nitrogen removal from coal gasification wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) in an oxygen-limited aeration sequencing batch biofilm reactor [J]. Bioresource Technology, 2017, 244(1):84-91.

(上接第44页)

[参考文献]

- [1] 罗珮珍,牛丽霞,罗向欣,等. 珠江磨刀门河口枯季叶绿素 a 环境因子驱动分析[J]. 广东海洋大学学报,2019,39(2):83-93.
- [2] 宋兵魁,齐树亭,李斯,等. 渤海湾氮、磷营养盐在水体和沉积物中的分布特征及其相互关系[J]. 海洋学研究,2019,37(1):83-90.
- [3] 王震,邹华,杨桂军,等. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学,2014,26(4):567-575.
- [4] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] DE CEBALLOS R S O, KÖNIG A, DE OLIVEIRA J F. Dam reservoir eutrophication: A simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation [J]. Water Research, 1998, 32(11):3477-3483.
- [6] 王叁,龙胜兴,李荔,等. 红枫湖水库叶绿素 a 分布特征与相关因子研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(2):895-897.
- [7] 张震. 氮元素及其对环境的影响[J]. 华章,2011(14):298.
- [8] 朱雨辉,张泽慧,徐瑶,等. 河道生态需水量估算及生态环境问题分析——以南充市西河流域顺庆城区段为例[J]. 内江师范学院学报,2019,34(12):62-66.
- [9] 卢俊平,马太玲,刘廷玺,等. 大河口水库底泥释磷强度环境影响机理研究[J]. 环境科学与技术,2017,40(7):72-78.

- [10] 张茜,冯民权,郝晓燕. 上覆水环境条件对底泥氮磷释放的影响研究[J]. 环境污染与防治,2020,42(1):7-11.
- [11] 顾振锋,王沛芳,陈娟,等. 望虞河西岸河流氮磷污染状况及其对调水水质的影响[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(11):1428-1435.
- [12] TRANVIK L J, DOWNING J A, COTNER J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6):2298-2314.
- [13] SCHULTZ P, URBAN N R. Effects of bacterial dynamics on organic matter decomposition and nutrient release from sediments: A modeling study [J]. Ecological Modelling, 2008, 210(1/2):1-14.
- [14] 黄慧琴,侯进菊,翁辰,等. 崇明岛典型河道水体中叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的相关分析[J]. 生态环境学报,2016,25(8):1369-1375.
- [15] 杨子超,李延林,邱小琮,等. 沙湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志,2020,41(2):77-82.
- [16] 杨广利,韩爱民,刘铁琨,等. 洪泽湖富营养化与环境理化因子间的关系[J]. 环境监测管理与技术,2003,15(2):17-20.
- [17] 王霞,刘雷,何跃,等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(2):58-61.
- [18] 廖宁,李洪,李嘉,等. 基于主成分分析的西南山区典型河道型水库富营养化评价讨论[J]. 中国农村水利水电,2019(11):104-109.
- [19] 赵旭德,许大毛,刘婷,等. 青山湖叶绿素 a 分布及其与水质因子的关联特征[J]. 环境化学,2018,37(7):1482-1490.

本栏目编辑 谢咏梅