

两种碳源对聚磷菌种群结构及除磷脱氮性能的影响

蔡曼莎^{1,2}, 吴苇杰^{1,2}, 莫少庆^{1,2}, 李苏琳^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 武昭昌^{1,2}, 王冬^{1,2}, 王少坡^{1,2*}

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384;

2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384)

摘要:分别以乙酸钠和丙酸钠作为有机碳源,利用序批式反应器系统对聚磷菌进行富集培养,通过高通量测序技术和化学分析,研究两种碳源对聚磷菌种类及除磷脱氮性能的影响。结果表明:稳定状态下,两者均取得良好的除磷率(>94%),丙酸钠对除磷的促进作用优于乙酸钠,丙酸钠对脱氮的促进作用低于乙酸钠;在科和属的水平上,丙酸钠系统的聚磷菌丰度均高于乙酸钠系统。

关键词:聚磷菌;除磷脱氮;乙酸钠;丙酸钠;种群结构

中图分类号:X703

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)04-0065-03

Impact of Two Carbon Sources on PAOs Population Structure and Phosphorus and Nitrogen Removal Performance

CAI Man-sha^{1,2}, WU Wei-jie^{1,2}, MO Shao-qing^{1,2}, LI Su-lin^{1,2}, CHEN Peng^{1,2},

WU Zhao-chang^{1,2}, WANG Dong^{1,2}, WANG Shao-po^{1,2*}

(1. School of the Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Taking sodium acetate and sodium propionate as organic carbon sources respectively, the impact of the two carbon sources on the structure of PAOs as well as nitrogen and phosphorus removal performance were studied based on PAOs enrichment culture by sequencing batch reactor(SBR) system, high-throughput sequencing technology and chemical analysis. The results indicated that in stable condition, the two carbon sources both had high phosphorus removal rate(>94%). Sodium propionate had better phosphorus removal effect but lower nitrogen removal effect than sodium acetate. The abundance of PAOs in sodium propionate system was higher than that in sodium acetate system at the level of family and genus.

Key words: PAOs; Nitrogen and phosphorus removal; Sodium acetate; Sodium propionate; Population structure

随着社会经济的飞速发展,污水中氮、磷的过量排放造成湖泊^[1]、城市景观水体^[2]等地表水体富营养化现象日益严重,对水环境、人类健康产生不利影响。研究高效、稳定的污水除磷脱氮技术,对提升地表水环境质量具有一定意义。我国颁布了《水污染防治行动计划》,对城镇污水处理厂出水中氮、磷含量等提出了更高的要求。通过调控微生物的代谢作用进行强化生物脱氮除磷是国内外污水处理研究及应用中最为广泛的一种方法。

强化生物除磷技术以高效经济、环境友好和潜在磷的可回收性等优点被广泛使用,不过,在机理

研究方面,功能微生物的工作机理及代谢机制仍有许多问题尚未解决^[3]。今采用厌氧/好氧(A/O)模式运行的序批式反应器(SBR),分别以乙酸钠、丙酸钠为碳源,考察两系统中活性污泥的除磷脱氮效果及系统中聚磷菌(PAOs)的优势菌,以期深入了解PAOs生化特性和高效利用提供支持和参考。

收稿日期:2020-05-08;修订日期:2021-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678388)

作者简介:蔡曼莎(1998—),女,广东潮州人,本科,研究方向为污水生物脱氮除磷技术与工艺。

*通信作者:王少坡 E-mail: wspfr@sina.com

1 材料与amp;方法

1.1 实验装置与amp;操作方式

实验采用 A/O 模式 SBR 反应器,高 30 cm,直径 20 cm,有效容积为 5 L,试验装置包括进水蠕动泵、出水电磁阀、转子流量计和原水水箱,内置电动搅拌及曝气装置。SBR 运行周期包括进水 5 min,反应 240 min,沉淀 100 min,排水 10 min 和闲置 5 min 5 个阶段。试验以 6 h 为 1 个周期。反应器运行温度为 $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$,pH 值为 8.0 ± 0.3 。

1.2 污水水质和接种污泥

实验进水由人工配制,碳源分别由乙酸钠和丙酸钠提供,C:N:P 质量比 400:20:20。进水中 COD 为 400 mg/L、 KH_2PO_4 为 88 mg/L、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 154.1 mg/L、 NH_4Cl 为 76.4 mg/L、 NaHCO_3 为 240 mg/L;微量元素溶液中 KI 为 0.18 g/L、 H_3BO_3 为 0.15 g/L、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 为 0.12 g/L、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 0.15 g/L、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 0.06 g/L、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为 0.03 g/L、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 0.12 g/L、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 1.5 g/L。试验接种污泥取自实验室强化生物除磷系统中的污泥,混合悬浮固体浓度 (MLSS) 为 $(4\,000 \pm 100)$ mg/L,污泥容积指数 (SVI) 为 90 mL/g ~ 110 mL/g,泥龄为 15 d。

1.3 测定

常规检测项目的测定^[4]: $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 采用钼酸铵分光光度法; $\text{NH}_3 - \text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用麝香草酚分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;SV 采用 30 min 沉降法;COD 采用快速消解分光光度法;MLSS 采用滤纸重量法;混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 采用马弗炉燃烧重量法;DO、pH 值、温度等参数均采用国家规定的标准方法测定。

菌种的测定:采用高通量测序,DNA 提取采用 DNA 提取试剂盒 (Omega, USA) 从污泥样品沉淀物中提取总菌群宏基因组 DNA,并测定 DNA 浓度。对其 16S rRNA V3 ~ V4 可变区进行 PCR 扩增,采用的引物序列为:338F (5' - ACTCCTRCGGAG-GCAGCAG - 3'),806R (5' - GGACTACCAGGG-TATCTAAT - 3')。PCR 结束后,进行凝胶电泳,产物的回收采用 SanPre 柱式 DNA 凝胶回收试剂盒。根据 Illumina Miseq 的操作,对形成的 cDNA 文库进行 2×300 bp 的高通量测序,对获得的 DNA 序列拼接,并进行质量控制。对有效 DNA 序列数据进行操作分类单元 (OTU) 分类。以上均委托上海

某生物工程股份有限公司测序。

2 结果与amp;讨论

2.1 乙酸钠为碳源时总磷及 COD 的去除情况

以乙酸钠为碳源,对接种污泥进行驯化培养,SVI₃₀ 为 $(27 \pm 2)\%$,MLSS 为 $(3\,959.21 \pm 363.34)$ mg/L,MLVSS 为 $(2\,906.26 \pm 243.23)$ mg/L,MLVSS/MLSS 值为 0.734 ± 0.019 。COD 去除和除磷性能见图 1(a)(b)。由图 1 可见,当以乙酸钠为碳源时,经过驯化期后,除磷效果仍不够稳定,随着反应时间的继续增长,除磷率达到 $(94.6 \pm 3.9)\%$,COD 去除率达到 $(88.5 \pm 9.5)\%$,在第 16 天达到最大值,去除污染物效果良好。

2.2 丙酸钠为碳源时总磷及 COD 的去除情况

采用丙酸钠作为碳源进行污泥培育,经过驯化期后,各指标较稳定,SVI₃₀ 为 $(26 \pm 2)\%$,MLSS 为 $(3\,863.8 \pm 417.18)$ mg/L,MLVSS 为 $(2\,797.62 \pm 334.35)$ mg/L,MLVSS/MLSS 值为 0.724 ± 0.024 。在同等条件下,丙酸钠系统磷的去除率为 $(98.2 \pm 1.4)\%$,COD 去除率达到 $(84.9 \pm 10.4)\%$,除磷效果稳定且保持在较高水平。对于该现象,Adrian 等^[5-6] 在研究乙酸钠和丙酸钠作为碳源的除磷研究中解释为丙酸系统不受 PAOs 影响,是丙酸系统较乙酸稳定的原因。此外,丙酸钠对磷的降解效果优于乙酸钠,这与吴昌永等^[7] 和李洪静等^[8] 的研究结果类似。刘燕等^[9] 也发现在相同进水浓度下,丙酸代谢比乙酸快,这与上述实验结果相符。

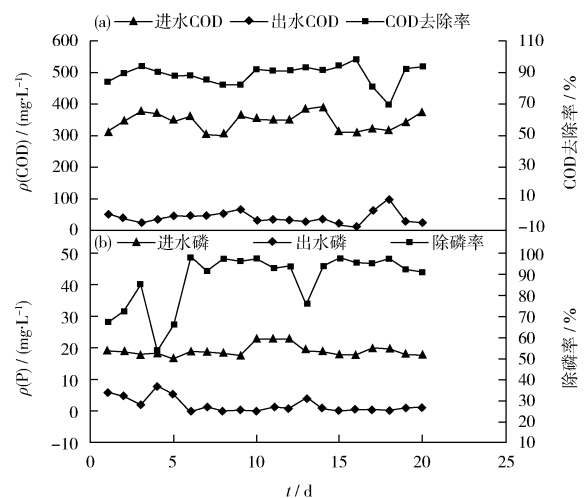


图 1 乙酸钠为碳源时的 COD 去除和除磷性能

Fig. 1 Removal properties of COD and phosphorus with sodium acetate as carbon source

也有一些研究认为乙酸作为碳源的除磷效果优于丙酸,邱春生等^[10]认为,对于长期稳定运行的系统,磷的去除率还与污泥的稳定性、温度等因素有关。初步判断可能是两种碳源对不同温度、碳氮磷比等条件的适应范围不同所致。

2.3 不同碳源间总氮的去除情况对比

乙酸钠为碳源时,出水总氮可达 2.41 mg/L,总氮去除率达到 (88.6 ± 4.6)%,反硝化效果较好。以丙酸钠作为碳源时,出水总氮达到 5.06 mg/L,总氮去除率为 (74.6 ± 14.7)%。显然丙酸钠作为碳源时的脱氮效果不及乙酸钠,这与徐亚同^[11]的研究结论相一致。该结论也可通过 OTU 在属水平和科水平下的物种丰度验证。已知丛毛单胞菌科 (Comamonadaceae)、亚硝化单胞菌科 (Nitrosomonadaceae) 中某些菌属具有脱氮性能^[12],假单胞杆菌科 (Pseudomonadaceae) 也是反硝化细菌中较为常见的高效菌群类型^[13],在上述研究的乙酸钠系统中这些具有脱氮性能的菌科,相对丰度均比在丙酸钠系统中高,这应该是乙酸钠系统总氮去除率高于丙酸钠系统的原因之一。

2.4 不同碳源作用下 PAOs 种类及含量分析

在用乙酸钠作为碳源的反应末,对反应器中的活性污泥取样进行高通量测序,结果见图 2。由图 2 可见,在科水平上,污泥中的 PAOs 按丰度排序为红环菌科 (Rhodocyclaceae) 15.16%、噬纤维菌科 (Cytophagaceae) 0.17%、假诺卡氏科 (Pseudonocardiaceae) 0.03%、慢生根瘤菌科 (Bradyrhizobiaceae) 0.01%。在属水平上,污泥中 PAOs 按丰度排序为脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*) 0.2%、气单胞菌属 (*Aeromonas*) 0.01%,PAOs 整体相对丰度偏低。

在用丙酸钠作为碳源的反应中,分别在系统除磷率高和除磷率低时对反应器中的活性污泥取样,进行高通量测序,结果见图 2。由图 2 可见,在科水平上,除磷率高时,PAOs 按丰度排序为 Rhodocyclaceae 39.23%、Moraxellaceae 0.53%、Cytophagaceae 0.04%、Pseudonocardiaceae 0.01%。由此可见,红环菌科的相对丰度远高于乙酸钠作为碳源时的相对丰度,成为系统的优势菌科。在除磷率低的丙酸钠系统中,PAOs 以丰度大小排序为 Rhodocyclaceae 4.08%、Cytophagaceae 0.14%、Pseudonocardiaceae 0.06%、Bradyrhizobiaceae 0.02%,其与除磷率高时的显著区别在于红环菌科相对丰度的下降。在属水平上,除磷率高时,PAOs 以丰度大小

排序为不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 0.52%、*Dechloromonas* 0.24%、*Aeromonas* 0.05%、红环菌属 (*Rhodocyclus*) 0.02%;除磷率低时,PAOs 按丰度排序为 *Acinetobacter* 1.17%、*Dechloromonas* 0.11%、*Aeromonas* 0.01%、分枝杆菌属 (*Mycobacterium*) 0.01%、棒杆菌属 (*Corynebacterium*) 0.01%,且 PAOs 整体相对丰度偏低。这也可以证明乙酸钠系统 PAOs 丰度较低,被 PAOs 利用的有机碳源较少,因而会有更多的有机碳源用于反硝化脱氮,并且乙酸钠系统 COD 去除率高于丙酸钠系统,即较多的有机碳源被用于反硝化脱氮。

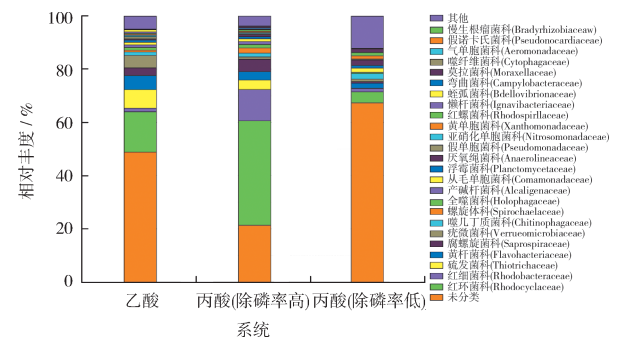


图 2 污泥内微生物菌群组成

Fig. 2 Composition of microbial flora in sludge

3 结语

丙酸钠系统平均除磷率为 98.2%,乙酸钠系统平均除磷率为 94.6%,丙酸钠系统除磷效率高于乙酸钠系统,COD 去除率分别为 84.9% 和 88.5%。在科和属的水平上,丙酸钠系统的 PAOs 丰度均高于乙酸钠系统,这是前者除磷效率高于后者的主要原因。乙酸钠系统脱氮效率高于丙酸钠系统,一方面是因为乙酸钠系统脱氮微生物丰度高于丙酸钠系统;另一方面是乙酸钠系统有更多的有机碳源用于反硝化脱氮。该研究结果为深入了解 PAOs 生化特性和高效利用提供了支持和参考,对研究高效、稳定的污水除磷脱氮技术具有一定意义。

[参考文献]

[1] 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.
 [2] 胡世龙,纪佳渊,陈荣,等. 西安市城市景观水体富营养化现状及成因分析[J]. 环境监测管理与技术,2016,28(5):62-65.
 [3] 田文德. BBSNP 工艺性能及反硝化聚磷菌除磷特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

(下转第 71 页)