

研究论文

强化生物除磷系统中聚磷菌菌群特性

马 斌¹, 彭永臻^{1,2}, 王淑莹², 葛士建², 杨莹莹², 祝贵兵¹

(¹ 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

² 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了研究强化除磷系统中聚磷菌 (PAOs) 菌群特性, 通过批次试验分别考察了厌氧/好氧 (A/O) 污泥和厌氧/缺氧 (A/A) 污泥吸磷特性。试验结果表明: A/O 污泥好氧吸磷速率 (q^{Po}) 大于缺氧吸磷速率 (q^{Pa}), 而 A/A 污泥 q^{Po} 却小于 q^{Pa} 。基于此试验结果可得出目前普遍应用 q^{Pa} 与 q^{Po} 的比值表征反硝化聚磷菌 (DPAOs) 占 PAOs 的相对百分比的方法不合理。聚磷菌菌群构成与电子受体类型有关, 根据电子受体类型可将 PAOs 分为三种, 即: P_{ON} (既能以氧作为电子受体, 也能以硝态氮作为电子受体)、 P_O (只能以氧作为电子受体) 和 P_N (只能以硝态氮作为电子受体)。

关键词: 强化生物除磷; 聚磷菌; 反硝化聚磷菌; 电子受体; 菌群特性

中图分类号: X 703

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 05-1282-04

Characterization of polyphosphate-accumulating bacteria
community structure in enhanced biological phosphorus removal reactor

MA Bin¹, PENG Yongzhen^{1,2}, WANG Shuying², GE Shijian², YANG Yingying², ZHU Guibing¹

(¹ State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of

Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; ² Beijing Key Laboratory of Water Quality Science
and Water Environment Recovery, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the characterization of polyphosphate-accumulating organisms (PAOs) community structure in an enhanced biological phosphorus removal system, the phosphorus uptake of anaerobic-oxic (A/O) sludge and anaerobic-anoxic (A/A) sludge were investigated *via* batch tests. The experiment results indicated that the A/O sludge had a higher aerobic phosphorus uptake rate than the anoxic phosphorus uptake rate, however, the aerobic phosphorus uptake rate of the A/A sludge was less than the anoxic phosphorus uptake rate of that sludge. Based on these results, the presently used method, in which the ratio of the anoxic phosphorus uptake rate (q^{Pa}) to the aerobic uptake rate (q^{Po}) gives the relative proportion of denitrifying polyphosphate-accumulating organisms (DPAOs) in the PAOs, is unreasonable. Furthermore, the PAOs community structure was related to the electron acceptor type. According to the type of electron acceptor, three groups of the PAOs could be proposed as follows: P_{ON} (using oxygen and nitrate as electron), P_O (using only oxygen as electron acceptor) and P_N (using only nitrate as electron acceptor).

Key words: enhanced biological phosphorus removal; polyphosphate-accumulating organisms; denitrifying polyphosphate-accumulating organisms; electron acceptor; bacterial community structure

2009-10-29 收到初稿, 2009-11-17 收到修改稿。

联系人: 彭永臻。第一作者: 马斌 (1982—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题 (2008ZX07314-

008-01); 北京高校人才强教计划高层次人才资助项目 (PHR20090502)。

Received date: 2009-10-29.

Corresponding author: Prof. PENG Yongzhen, pyz @

bjtu.edu.cn

引 言

污水强化生物除磷技术主要通过聚磷菌 (PAOs) 在好氧或缺氧条件下过量吸磷, 而后排放富磷剩余污泥达到将磷从污水中去除的目的^[1]。生物强化除磷包括厌氧释磷和好氧 (缺氧) 吸磷两个过程, 即: 在厌氧条件下 PAOs 降解体内的聚磷颗粒 (poly-P) 产生能量、释放出磷酸盐, 同时吸收水中的有机物, 并将其转化为聚 β -羟基链烷酸盐 (PHAs) 贮存于细胞内; 好氧或缺氧条件下, PAOs 氧化分解体内 PHAs, 合成糖原, 同时过量吸收水中的磷酸盐合成聚磷酸盐, 从而达到去除水中磷的目的^[2-4]。

PAOs 能以氧、硝态氮 (NO_3^- -N) 和亚硝态氮 (NO_2^- -N) 作为电子受体进行吸磷作用^[5-6]。根据电子受体的不同, 不同的研究者提出了不同的 PAOs 分类方法。一些研究认为 PAOs 可以分为两类, 一类只能以氧作为电子受体; 另一类既能以氧作为电子受体, 又能以 NO_3^- -N 作为电子受体^[1,7]。也有研究认为 PAOs 应该分为三类: 一类只能以氧作为电子受体, 第二类可以氧或 NO_3^- -N 作为电子受体, 第三类能以氧、 NO_3^- -N 或 NO_2^- -N 作为电子受体^[5]。以上研究都认为所有 PAOs 都能以氧作为电子受体, 只有部分 PAOs 可以利用硝态氮作为电子受体, 同时 Kuba 等^[8]研究发现厌氧/缺氧驯化的聚磷菌缺氧吸磷速率基本等于好氧吸磷速率, 在此基础上 Wachtmeister 等^[7]提出用缺氧吸磷速率 (q^{Pa}) 与好氧吸磷速率 (q^{Po}) 的比值表征 DPAOs 占 PAOs 的相对百分比。此方法至今仍被普遍采用, 如 Zhang 等^[9] 2009 年研究 MUCT-MBR 除磷特性时, 仍应用 $q^{\text{Pa}}/q^{\text{Po}}$ 来确定 DPAOs 占 PAOs 的相对百分含量。是否存在一种 PAOs 不能以氧作为电子受体, 只能以硝态氮作为电子受体? 为了深入了解 PAOs 菌群特性, 本试验通过批次试验考察了厌氧/好氧 (A/O) 污泥和厌氧/缺氧 (A/A) 污泥吸磷特性。

1 材料与方法

1.1 试验污泥

A/O 污泥取自本实验室除磷效果稳定的以 A/O 方式运行的 SBR 强化除磷系统 (A/O-SBR)。A/O-SBR 系统运行方式: 瞬间进水, 厌氧搅拌 2 h, 曝气 3 h, 沉淀 0.5 h, 瞬间排水。A/O-SBR

系统稳定运行 30 d 后, 改为厌氧/缺氧 (A/A) 方式运行, 即: 瞬间进水, 厌氧搅拌 2 h, 中间沉淀排水 0.5 h, 瞬间进水 (进水含 NO_3^- -N, 不含有机物), 缺氧搅拌 4 h, 沉淀 0.5 h, 排水。A/A 污泥取自运行 30 d 后的 A/A-SBR 系统。A/A-SBR 系统中设置中间沉淀排水, 目的是消除厌氧放磷过程中未被聚磷菌吸收转化的残余有机物对反硝化聚磷菌的影响, 限制常规异养反硝化菌的生长。

1.2 批次试验方法

A/O 污泥批次试验: 取 A/O-SBR 反应器厌氧释磷后的污泥 (泥水混合液) 2 L, 用自来水清洗三遍以消除 COD 对缺氧吸磷的影响, 而后分成两等份加入批次试验反应器 1[#] 和 2[#]。对 1[#] 反应器进行曝气, 使其 DO 大于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而保证好氧吸磷时氧不会成为限制因素; 向 2[#] 反应器加入硝酸盐, 使混合液初始 NO_3^- -N 浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而保证缺氧吸磷时电子受体足量。缺氧反应过程中 ORP 为 $-62.1 \sim -77.2 \text{ mV}$ 。批次试验过程中, 通过投加 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠溶液来调节混合液的 pH 值, 使其控制在 7.0 ± 0.1 , 同时通过恒温加热棒控制水温为 $(24 \pm 0.3) ^\circ\text{C}$ 。

A/A 污泥批次试验: 取 A/A-SBR 反应器厌氧释磷后的污泥 (泥水混合液) 重复上述试验。缺氧反应过程中 ORP 为 $-63.8 \sim -84.2 \text{ mV}$ 。

1.3 试验水质

A/O-SBR 系统和 A/A-SBR 系统进水采用人工配水模拟实际生活污水, 其配水水质如表 1 所示。需要指出的是, A/A-SBR 系统中, 缺氧搅拌前的瞬间进水不含 COD, 含有高浓度 PO_4^{3-} -P 和 NO_3^- -N, 进水后反应器内起始 PO_4^{3-} -P 浓度平均为 $60.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 浓度平均为 $54.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 1 模拟废水成分及水质指标

Composition		Quality	
Compound	Concentration / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Parameter	Concentration / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
NaAc	384.4	COD	300
NH_4Cl	112.5	NH_4^+ -N	30
KH_2PO_4	49.4	PO_4^{3-} -P	11
NaHCO_3	300	NO_x -N	< 1
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	90	alkalinity	200—450
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	14		
trace elements ^[10] $0.3 \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$			

1.4 分析项目及分析方法

COD: 重铬酸钾法测定; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$: 麝香草酚分光光度法测定; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: N - (1-萘基) - 乙二胺光度法; 溶解性 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$: 氯化亚锡还原光度法; MLSS: 滤纸称重法; pH 值: WTW inolab level 2 在线监测。

2 试验结果

2.1 A/O 污泥吸磷特性

A/O 污泥好氧、缺氧吸磷特性如图 1 所示。A/O 污泥取自 A/O-SBR 系统, 此污泥长期以氧作为电子受体进行吸磷作用。由图 1 可见, A/O 污泥可以进行缺氧吸磷作用, 即常规生物除磷系统中就存在 DPAOs。A/O 污泥好氧吸磷速率 (q^{Po}) 为 $10.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 缺氧吸磷速率 (q^{Pa}) 为 $4.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。 $q^{\text{Po}} > q^{\text{Pa}}$, 此结果与 Kuba 等^[7-8] 研究结果相一致。

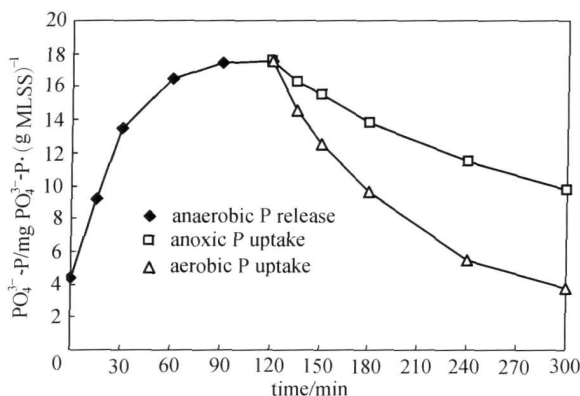


图 1 A/O 污泥在好氧、缺氧条件下的吸磷情况比较

Fig 1 Phosphorus uptake tests under aerobic and anoxic conditions using A/O sludge

2.2 A/A 污泥吸磷特性

A/A 污泥吸磷特性如图 2 所示。A/A 污泥取自长期以硝态氮作为电子受体的 A/A-SBR 系统。A/A 污泥好氧吸磷速率 (q^{Po}) 为 $10.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 缺氧吸磷速率 (q^{Pa}) 为 $16.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。 $q^{\text{Po}} < q^{\text{Pa}}$, 此试验结果与 Kuba 等^[7-8] 研究结果相悖。Kuba 等认为所有的 PAOs 都可以以氧作为电子受体, 而只有一部分 PAOs 可以以硝态氮作为电子受体, 基于此观点, 好氧吸磷速率 (q^{Po}) 不可能小于缺氧吸磷速率 (q^{Pa})。 q^{Pa} 大于 q^{Po} 就说明 PAOs 除包含 Kuba 等提出的两类 PAOs 外, 还有一类 PAOs 只能以硝态氮作为电子受体。

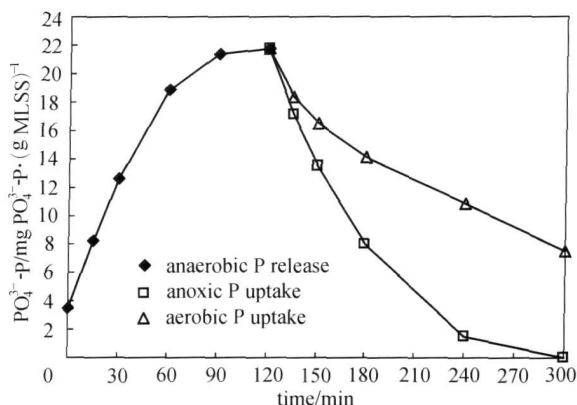


图 2 A/A 污泥在好氧、缺氧条件下的吸磷情况比较

Fig 2 Phosphorus uptake tests under aerobic and anoxic conditions using A/A sludge

2.3 A/O 污泥和 A/A 污泥释磷速率和吸磷速率比较

图 3 为 A/O 污泥和 A/A 污泥释磷速率与吸磷速率比较。从图中可以看出, A/O 污泥和 A/A 污泥的厌氧释磷速率和好氧吸磷速率变化不大, 而缺氧吸磷速率却由 $4.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 变为了 $16.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。A/O-SBR 系统运行方式改为 A/A 时, 污泥的电子受体由氧转变为硝态氮, 污泥系统生境变化, 使得污泥菌群结构发生变化, 这可能是引起缺氧吸磷速率变化的原因。

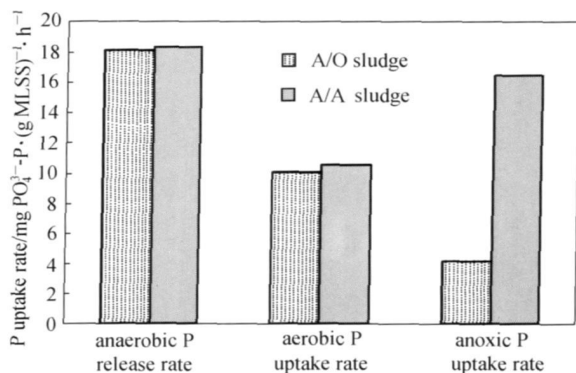


图 3 A/O 污泥和 A/A 污泥吸磷速率比较

Fig 3 Comparison of phosphorus uptake rates between A/O sludge and A/A sludge

3 讨 论

基于 q^{Pa} 大于 q^{Po} 的试验结果, 可得出 PAOs 可分为三种菌: 第一种既能以氧作为电子受体, 也能以硝态氮作为电子受体, 记作 P_{ON} ; 第二种只能以氧作为电子受体, 记作 P_{O} ; 第三类只能以硝态氮

作为电子受体, 记作 P_N 。在常规生物除磷系统中, 主要以氧作为电子受体进行吸磷作用, 系统中存在的 PAOs 主要为 P_{ON} 和 P_O , 同时还可能存在少量的 P_N , 这就使得 A/O-SBR 污泥好氧吸磷速率 (q^{P_O}) 大于缺氧吸磷速率 (q^{P_A})。在 A/A-SBR 系统中, 通过以硝态氮作为电子受体的驯化, 使得 P_N 的含量增加, 进而导致缺氧吸磷速率从 $4.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 增至 $16.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 出现好氧吸磷速率 (q^{P_O}) 小于缺氧吸磷速率 (q^{P_A}) 的现象 (如图 3 所示)。因此在强化生物除磷系统中, 聚磷菌菌群结构的变化与系统的电子受体类型有关。但为什么在以往研究 A/A 污泥特性时没有发现好氧吸磷速率 (q^{P_O}) 小于缺氧吸磷速率 (q^{P_A}) 的现象? 针对此问题, 此后将运用分子生物学手段研究聚磷菌菌群微观结构与其生境的关系。

PAOs 分为三种菌的观点也揭示出, 用 q^{P_A}/q^{P_O} 来表征 DPAOs 占 PAOs 相对百分含量的方法不合理。作者建议采用缺氧吸磷速率来表征反硝化吸磷活性, 为了比较污泥好氧吸磷特性和缺氧吸磷特性的不同, 也可以采用 q^{P_A}/q^{P_O} 作为参数进行比较, 但是此参数的意义已不再是 DPAOs 占 PAOs 的相对百分含量, 而仅仅是缺氧吸磷速率和好氧吸磷速率的比值。同时 PAOs 至少存在三种菌群的观点也对活性污泥数学模型有一定的影响。

4 结 论

(1) PAOs 可分为三种菌: P_{ON} (既能以氧作为电子受体, 也能以硝态氮作为电子受体)、 P_O (只能以氧作为电子受体) 和 P_N (只能以硝态氮作为电子受体)。PAOs 菌群结构变化与电子受体类型有关。

(2) 用缺氧吸磷速率 (q^{P_A}) 与好氧吸磷速率 (q^{P_O}) 的比值表征 DPAOs 占 PAOs 的相对百分比的方法不合理。

References

- [1] Meinhold J, Filipe C D M, Daigger G T, Isaacs S. Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal. *Water Science and Technology*, 1999, 39 (1): 31-42
- [2] Mino T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. *Water Research*, 1998, 32 (11): 3193-3207
- [3] de Bashan L E, Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003). *Water Research*, 2004, 38 (19): 4222-4246
- [4] Seviour R J, Mino T, Onuki M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, 27 (1): 99-127
- [5] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, Lu F, Fan X J. A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors. *Water Research*, 2003, 37 (14): 3463-3471
- [6] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, Hirata A. Metabolic behavior of denitrifying phosphate accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2001, 92 (5): 442-446
- [7] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge. *Water Research*, 1997, 31 (3): 471-478
- [8] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Effect of cyclic oxygen exposure on the activity of denitrifying phosphorus removing bacteria. *Water Science and Technology*, 1996, 34 (1/2): 33-40
- [9] Zhang H M, Wang X L, Xiao J N, Yang F L, Zhang J. Enhanced biological nutrient removal using MUCT-MBR system. *Bioresour. Technology*, 2009, 100 (3): 1048-1054
- [10] Smolders G J F, van der Meij J, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, 44 (7): 837-848