

进水 C/P 值对高温聚磷菌除磷性能的影响

常 蝶¹, 彭党聪¹, 李 胜², 孔繁涛²

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市污水处理有限责任公司, 陕西 西安 710025)

摘 要: 以高温(30 ℃)条件下长期稳定运行的强化生物除磷(EBPR)反应器中的污泥为研究对象,探讨 C/P 值对高温聚磷菌(PAO_{HT})除磷性能的影响,并通过荧光原位杂交技术(FISH)分析污泥中微生物群落结构的变化。试验结果表明,当 C/P 值为 20、25 和 30 时,最大厌氧释磷速率分别为 151.86、157.15、193.75 mgP/(gVSS·h),最大好氧吸磷速率分别为 25.15、38.51、39.25 mgP/(gVSS·h),污泥中 PAOs 含量分别为 22.36%、34.53% 和 86.01%,而聚糖菌(GAOs)含量分别为 10.38%、8.91% 和未检出。在高温条件下,高 C/P 值有利于 PAOs 的富集,可增加污泥释磷和吸磷速率,从而获得较高的除磷效率。

关键词: 强化生物除磷; C/P 值; 聚磷菌; 高温; 荧光原位杂交技术

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0083-04

Effect of Influent C/P Ratio on Phosphorus Removal Performance of High-temperature Phosphorus Accumulating Organisms

CHANG Die¹, PENG Dang-cong¹, LI Sheng², KONG Fan-tao²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Wastewater Treatment Co. Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: The effect of different C/P ratios on phosphorus removal performance of high-temperature phosphorus accumulating organisms (PAO_{HT}) was investigated, and variation of microbial community structure was analyzed by fluorescence in situ hybridization (FISH). The above sludge was from an enhanced biological phosphorus removal (EBPR) reactor operated at high temperature (30 ℃) for a long time. The results showed that the maximum anaerobic phosphorus release rates were 151.86 mgP/(gVSS·h), 157.15 mgP/(gVSS·h) and 193.75 mgP/(gVSS·h), and the maximum aerobic phosphorus uptake rates were 25.15 mgP/(gVSS·h), 38.51 mgP/(gVSS·h) and 39.25 mgP/(gVSS·h), when the C/P ratios were controlled in 20, 25 and 30. The content of PAOs in the activated sludge was 22.36%, 34.53% and 86.01%, while those of glycogen accumulating organisms (GAOs) were 10.38%, 8.91% and n. d. (not detected). Under the condition of high temperature, the high C/P ratio was conducive to the enrichment of PAOs, which led to the increase of phosphorus release rate and uptake rate and improved the phosphorus removal efficiency.

Key words: enhanced biological phosphorus removal (EBPR); C/P ratio; phosphorus accumulating organisms (PAOs); high temperature; fluorescence in situ hybridization (FISH)

目前,强化生物除磷(EBPR)系统被广泛应用。但在污水厂实际运行中发现,EBPR 系统的除磷效

果难以保持稳定,且易于恶化。这是因为系统中存在一类在厌氧阶段与聚磷菌(PAOs)竞争挥发性脂

肪酸(VFAs)的微生物——聚糖菌(GAOs),其可以利用VFAs,但是没有除磷作用^[1]。因此,EBPR系统稳定运行的关键在于提高活性污泥中PAOs对有限基质的竞争能力。影响PAOs和GAOs之间竞争的因素很多,包括碳源、pH值、DO、温度和C/P值等^[2-6]。其中,C/P值对PAOs的生长至关重要,其对EBPR系统的释磷和吸磷量、除磷率及群落结构具有显著的影响^[7-8]。一般情况下,当温度低于20℃时有利于PAOs的富集。然而有研究发现,强化生物除磷系统在高温(28~32℃)条件下仍可高效运行^[9]。张玲等人^[10]利用SBR反应器在30℃下培养了可以适应高温的聚磷菌(PAO_{HT}),但是进水C/P值对EBPR系统中PAOs与GAOs竞争的影响尚无定论,尤其是在高温条件下C/P值对除磷性能的影响尚不清楚。因此,探究高温条件下C/P值对聚磷菌除磷性能的影响,对于进一步获得高温条件下EBPR系统的稳定运行具有十分重要的意义。

笔者以长期稳定运行的高温EBPR反应器为研究对象,分析C/P值对PAO_{HT}除磷性能的影响。在此基础上,探讨C/P值对PAO_{HT}释磷、吸磷速率以及VFAs利用效率的影响,并采用荧光原位杂交技术(FISH)分析不同C/P值条件下EBPR系统中污泥的种群结构。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行参数

试验装置如图1所示。反应器有效容积为5 L,运行周期为4 h,其中进水时间为7 min、厌氧时间为1 h、好氧时间为2 h、沉淀时间为35 min、出水时间为16 min、闲置时间为2 min。反应器的温度控制在(30±1)℃,系统的温度、搅拌、曝气、进出水、排泥等均由PLC自动控制。

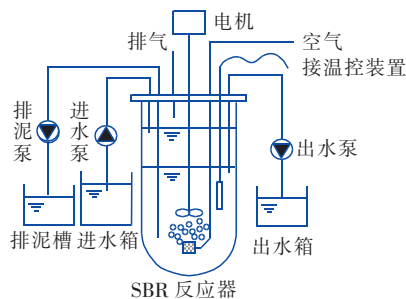


图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device
反应器在高温(30℃)条件下已稳定运行630 d

(水力停留时间为8 h,污泥停留时间为8 d)。进水采用人工配制,磷酸盐浓度为10 mg/L,COD(来源于乙酸)浓度随C/P值的改变分别控制为200、250和300 mg/L。

1.2 检测分析方法

PO₄³⁻-P采用钼锑抗分光光度法测定,TP采用5%过硫酸钾消解法测定,悬浮固体(SS)和挥发性悬浮固体(VSS)采用重量法测定,VFAs采用气相色谱法测定,COD采用重铬酸钾法测定,pH值采用玻璃电极法测定,DO采用便携式溶氧仪测定。聚磷菌的释磷和吸磷速率、FISH分析均按照文献[10]进行测定。

2 结果与讨论

2.1 磷酸盐浓度和污泥浓度的变化

不同C/P值条件下,反应器中磷酸盐浓度和污泥浓度的变化如图2所示。可以看出,试验期间,反应器对磷酸盐的去除率较高,可以达到80%以上。当进水C/P值为30时,出水磷酸盐浓度始终低于0.1 mg/L,去除率高达99%以上,反应器可以高效、稳定运行;当C/P值降至20时,出水磷酸盐浓度逐渐升高,基本稳定在2 mg/L左右,去除率为80%;当C/P值为25时,出水磷酸盐浓度维持在1 mg/L左右,去除率达到90%。可见,在高温条件下,只有C/P值为30时,出水磷浓度才能满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。

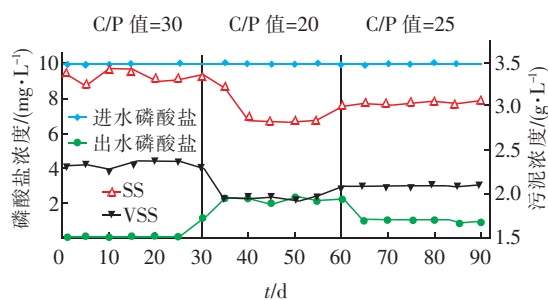


图2 磷酸盐及污泥浓度的变化

Fig. 2 Change of PO₄³⁻-P and sludge concentration

本试验中,SBR反应器的HRT和SRT保持不变。从图2还可以看出,污泥的SS和VSS浓度均随着C/P值的减小而降低。当C/P值为30时,SS和VSS分别稳定在3.29和2.30 g/L;当C/P值为20时,SS和VSS分别稳定在2.80和1.94 g/L;当C/P值为25时,SS和VSS分别稳定在3.02和2.07

g/L。这是由于在进水磷酸盐浓度不变的条件下, C/P 值降低,说明进水 COD 浓度随之下降,导致进水 COD 负荷降低,从而使 SS 和 VSS 降低。

2.2 释磷速率、吸磷速率和乙酸吸收速率的变化

在不同 C/P 值条件下,测定污泥的释磷速率、吸磷速率和乙酸吸收速率,结果如图 3 所示。经计算,在厌氧阶段,当 C/P 值分别为 20、25 和 30 时,最大厌氧释磷速率分别为 151.86、157.15 和 193.75 $\text{mgP}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$,同时最大乙酸吸收速率分别为 376.41、281.84 和 279.88 $\text{mgHAc}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$,吸收单位乙酸的释磷量(同一时间段内,最大厌氧释磷速率与最大乙酸吸收速率的比值, $\Delta\text{P}/\Delta\text{HAc}$)分别为 0.38、0.56 和 0.69。可见,随着 C/P 值的升高, PAO_{HT} 的厌氧释磷速率逐渐增加,乙酸吸收速率逐渐降低,吸收单位乙酸的释磷量逐渐增加。此外,反应器中磷酸盐的最高浓度也随着 C/P 值的升高而增加,说明单位体积污泥的释磷能力逐渐增强。

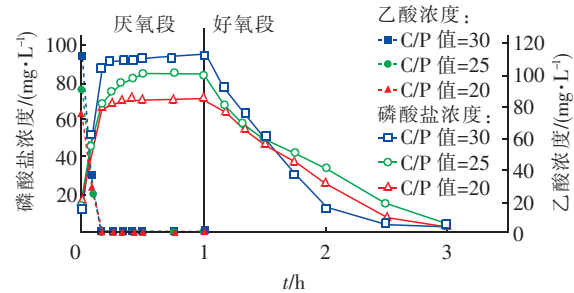


图 3 典型周期内混合液中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和乙酸的历时变化

Fig. 3 Change of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ and acetic acid concentrations in typical cycle

由图 3 可知,在好氧阶段,磷酸盐浓度随着时间的增加而降低,说明在该阶段吸磷速率逐渐减慢。当 C/P 值分别为 30、25 和 20 时,最大好氧吸磷速率分别为 39.25、38.51 和 25.15 $\text{mgP}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 。可见,随着 C/P 值的降低, PAO_{HT} 的好氧吸磷速率逐渐降低。

2.3 微生物的群落结构

不同 C/P 值的 EBPR 系统分别经过 30 d 的运行处理后,系统中微生物菌群均发生了变化,主要表现在 PAOs 和 GAOs 所占总菌的比例发生了改变。图 4 为 C/P 值分别为 30、25 和 20 时, SBR 反应器污泥中的 FISH 检测结果(蓝色为总细菌,绿色为聚磷菌,红色为聚糖菌)。由图 4(a)可以看出,在进水 C/P 值为 30 的条件下,在 EBPR 系统的活性污泥

中, PAOs 为优势菌, 占总细菌数的 86.01%, 而且系统中未发现 GAOs。同时, 对应的 $\Delta\text{P}/\Delta\text{HAc}$ 值为 0.69, 说明 EBPR 系统具有良好的释磷、吸磷及基质利用速率。

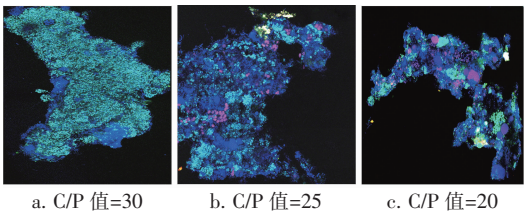


图 4 不同 C/P 值下活性污泥中微生物的群落结构

Fig. 4 Microbial community structure in activated sludge under different C/P ratios

由图 4(b)可以看出,当进水 C/P 值降至 25 时,活性污泥中 GAOs 的含量明显增加, 占总细菌数的 8.91%, 而 PAOs 的含量明显降低, 为 34.53%。此时对应的 $\Delta\text{P}/\Delta\text{HAc}$ 值为 0.56, 说明在厌氧阶段 GAOs 与 PAOs 共同竞争有限的基质(乙酸), 导致进水中的部分基质被 GAOs 利用, 由于 GAOs 并没有释磷能力, 从而使得 $\Delta\text{P}/\Delta\text{HAc}$ 值相应下降。

在进水 C/P 值为 20 的条件下,活性污泥中的 GAOs 含量继续增大, 为 10.38%, 而 PAOs 的含量仅为 22.36%。可见 GAOs 有超越 PAOs 成为优势菌的趋势。由于污泥中含有大量的 GAOs, 导致 PAOs 的释磷、吸磷速率和 $\Delta\text{P}/\Delta\text{HAc}$ 值均大幅降低, 出水磷酸盐浓度增加。此外, FISH 检测结果显示污泥中的 GAOs 主要以菌胶团的形式存在。

表 1 为不同温度和 C/P 值下活性污泥中 PAOs 和 GAOs 的占比。结合蒋涛等^[7]的研究结果可知, 无论是高温还是低温, 当 C/P 值增加时, PAOs 的竞争能力增强, 使得 PAOs 在污泥中的占比增加。而在高温条件下, Ong 等人^[9]培养的高温聚磷菌占总细菌数的 $(33 \pm 5)\%$, 而本研究中 PAO_{HT} 的占比高达 86.01%, 两者差异明显, 说明 PAO_{HT} 在 C/P 值为 30 时, 具有更好的增殖和基质竞争能力。

表 1 不同污泥中 PAOs 和 GAOs 的占比

Tab. 1 Proportion of PAOs and GAOs in different sludge

温度/ $^{\circ}\text{C}$	C/P 值	PAOs/%	GAOs/%	备注
28	10	33 ± 5	7 ± 2	文献[9]
20	10	10.4 ± 0.97	34.25 ± 2.59	文献[7]
20	25	76.42 ± 1.24	16.36 ± 3.41	文献[7]
30	25	34.53	8.91	本研究
30	30	86.01	未检出	本研究

3 结论

① 当C/P值分别为30、25和20时,EBPR系统的除磷效率可达到80%以上,且C/P值越高,对磷的去除率也越高。

② C/P值越高,污泥中PAOs的占比越高,对应的最大释磷、吸磷速率越大,利用单位乙酸的释磷量也越大。

③ C/P值对高温聚磷菌的影响规律与常温聚磷菌相似,即随着C/P值的增加,活性污泥中GAOs的含量减少,而PAOs的含量增加。

参考文献:

- [1] Lopez-Vazquez C M, Oehmen A, Hooijmans C M, *et al.* Modeling the PAO – GAO competition: Effects of carbon source, pH and temperature [J]. *Water Res*, 2009, 43 (2): 450 – 462.
- [2] Carvalho M, Oehmen A, Carvalho G, *et al.* The effect of substrate competition on the metabolism of polyphosphate accumulating organisms (PAOs) [J]. *Water Res*, 2014, 64: 149 – 159.
- [3] Carvalho M, Oehmen A, Carvalho G, *et al.* The impact of aeration on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms [J]. *Water Res*, 2014, 66: 296 – 307.
- [4] Coats E R, Watkins D L, Brinkman C K, *et al.* Effect of anaerobic HRT on biological phosphorus removal and the enrichment of phosphorus accumulating organisms [J]. *Water Environ Res*, 2011, 83 (5): 461 – 469.
- [5] Chen H B, Wang D B, Li X M, *et al.* Effect of dissolved oxygen on biological phosphorus removal induced by aerobic/extended-idle regime [J]. *Biochem Eng J*, 2014, 90: 27 – 35.
- [6] López-Vázquez C M, Hooijmans C M, Brdjanovic D, *et al.* Factors affecting the microbial populations at full-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) wastewater treatment plants in The Netherlands [J]. *Water Res*, 2008, 42 (10/11): 2349 – 2360.
- [7] 蒋涛, 方婧, 孙培德, 等. C/P对EBPR系统PAOs与GAOs竞争及PHAs代谢过程影响研究[J]. *环境科学*, 2010, 31 (12): 2938 – 2944.
- Jiang Tao, Fang Jing, Sun Peide, *et al.* Effects of C/P on the competition between PAOs and GAOs and PHAs metabolism in EBPR system [J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (12): 2938 – 2944 (in Chinese).
- [8] Ong Y H, Chua A S M, Lee B P, *et al.* Long-term performance evaluation of EBPR process in tropical climate: start-up, process stability, and the effect of operational pH and influent C : P ratio [J]. *Water Sci Technol*, 2013, 67 (2): 340 – 346.
- [9] Ong Y H, Chua A S M, Fukushima T, *et al.* High-temperature EBPR process: The performance, analysis of PAOs and GAOs and the fine-scale population study of *Candidatus "Accumulibacter phosphatis"* [J]. *Water Res*, 2014, 64: 102 – 112.
- [10] 张玲, 彭党聪, 常蝶. 温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38 (6): 2429 – 2434.
- Zhang Ling, Peng Dangcong, Chang Die. Effect of temperature on PAO activity and substrate competition [J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (6): 2429 – 2434 (in Chinese).



作者简介:常蝶(1993 –),女,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事废水生物处理理论与技术方面的研究。

E-mail: 13201638109@163.com

收稿日期:2018-06-12