

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.003

# 污泥龄对 BBSNP 工艺反硝化除磷脱氮效能的影响

李伟光<sup>1,2</sup>, 李东辉<sup>1</sup>, 姚杰<sup>3</sup>, 张光林<sup>1</sup>, 张厚强<sup>3</sup>, 牛礼跃<sup>3</sup>, 张福贵<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203; 4. 龙江环保集团股份有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150050)

**摘要:** 基于上海某污水处理厂的生产性试验装置,研究了污泥龄(SRT)对两级生物选择反硝化除磷脱氮(BBSNP)工艺反硝化除磷效能的影响。结果表明,SRT对BBSNP工艺的反硝化除磷效能有着较大的影响。当将SRT从7 d提高到15 d时,厌氧区的COD去除率由62.37%提高到80.32%;缺氧吸磷率均值由33.9%提高到77.9%,厌氧释磷倍数由3.11倍提高到4.13倍;总氮去除率由68.27%提高到74.05%,这表明系统内富集了大量的反硝化聚磷菌,表现出良好的反硝化除磷效果,提高了出水水质。

**关键词:** 两级生物选择反硝化除磷脱氮工艺; 污泥龄; 缺氧吸磷率; 反硝化聚磷菌

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0013-05

## Effect of Sludge Retention Time on Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of Bi-bio-selector for Nitrogen and Phosphorus Removal Process

LI Wei-guang<sup>1,2</sup>, LI Dong-hui<sup>1</sup>, YAO Jie<sup>3</sup>, ZHANG Guang-lin<sup>1</sup>, ZHANG Hou-qiang<sup>3</sup>, NIU Li-yue<sup>3</sup>, ZHANG Fu-gui<sup>4</sup>

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin 150090, China; 3. Shanghai Chengtong Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 201203, China; 4. Longjiang Environmental Protection Group Co. Ltd., Harbin 150050, China)

**Abstract:** Effect of sludge retention time (SRT) on the nitrogen and phosphorus removal efficiency of the bi-bio-selector for nitrogen and phosphorus removal (BBSNP) process was explored based on full-scale test device in a municipal sewage treatment plant in Shanghai. The results showed that SRT had a great influence on nitrogen and phosphorus removal efficiency of the BBSNP process. After increasing the SRT from 7 days to 15 days, COD removal efficiency in the anaerobic tank increased from 62.37% to 80.32%, the anoxic phosphorus uptake rate increased from the average of 33.9% to 77.9%, the anaerobic phosphorus release time increased from 3.11 times to 4.13 times, and the total nitrogen removal efficiency increased from 68.27% to 74.05%. This indicated that a large number of denitrifying phosphorus accumulating bacteria were enriched in the system, which showed a good removal

effect of nitrogen and phosphorus and improved the effluent quality.

**Key words:** bi-bio-selector for nitrogen and phosphorus removal (BBSNP) process; sludge retention time; anoxic phosphorus uptake rate; denitrifying phosphorus accumulating bacteria

目前我国许多污水处理厂采用的是 A/O 或 A<sup>2</sup>/O 工艺,但存在同步脱氮除磷效果不理想的问题<sup>[1]</sup>,主要原因是:①生活污水的低 C/N 值导致的普通反硝化菌与聚磷菌对碳源的竞争;②硝化菌和聚磷菌污泥龄(SRT)不同的矛盾;③回流污泥中携带的硝酸盐对厌氧释磷的干扰等<sup>[1]</sup>。1993年,Kuba 等人<sup>[2]</sup>在利用厌氧-缺氧间歇式反应器进行实验的过程中,富集到了一种兼具反硝化和除磷能力的兼性厌氧微生物(后来被称为反硝化聚磷菌),其可以在厌氧池利用进水中的挥发性脂肪酸(VFA)合成内碳源 PHA,同时进行释磷,在缺氧池利用内碳源进行吸磷的同时完成反硝化,实现“一碳两用”。与传统活性污泥法相比,反硝化除磷工艺可以减少 50% 的碳源需求、30% 的需氧量和 50% 的剩余污泥产量,同时还可以减少 CO<sub>2</sub> 的排放量。

基于上述理论,课题组开发了两级生物选择反硝化除磷脱氮(BBSNP)工艺,该工艺是传统 A<sup>2</sup>/O 工艺的改良,在 A<sup>2</sup>/O 工艺的厌氧池末端增加缺氧选择池用于接回流污泥,并增加了从缺氧池末端至厌氧池前端的回流。相较于传统的 A<sup>2</sup>/O 工艺,该工艺具有以下优点:①缺氧选择池的设置降低了回流污泥中硝酸盐对厌氧释磷的影响;②特有的回流方式强化了系统厌氧-缺氧交替环境,优化了反硝化聚磷菌富集的条件<sup>[3]</sup>;③反硝化聚磷菌可以实现“一碳两用”,降低了脱氮除磷过程对碳源的需求,对低 C/N 值进水有很好的处理效果;④反硝化聚磷菌较长的污泥龄解决了普通反硝化菌和聚磷菌的污泥龄矛盾。这些特性可以提高城市污水处理厂的同步脱氮除磷效能,同时降低运行能耗。

有关研究表明,SRT 是水处理工艺运行过程中的一个重要参数,一方面反映了系统中微生物的世代周期,影响着功能菌群的富集程度;另一方面在一定程度上影响系统对污染物的去除效果<sup>[4]</sup>。为

表 1 BBSNP 工艺进水水质

Tab. 1 Influent quality of BBSNP process

mg · L<sup>-1</sup>

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	氨氮	TN	TP	碱度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)
范围	205.11 ~ 360.23	121.21 ~ 132.96	15.88 ~ 29.74	21.68 ~ 34.90	2.57 ~ 5.76	180.56 ~ 229.81
均值	258.19	126.51	23.72	28.47	4.22	215.62

此,笔者探究了 SRT 对 BBSNP 工艺运行效果的影响机制,旨在获得最佳的 SRT,以提高系统的反硝化聚磷菌富集能力和脱氮除磷效能。

## 1 材料与方法

### 1.1 工艺流程

本实验基于上海某污水处理厂内的 BBSNP 工艺生产性试验装置开展相关研究。BBSNP 工艺流程见图 1,生化反应池总体积为 35.53 m<sup>3</sup>。

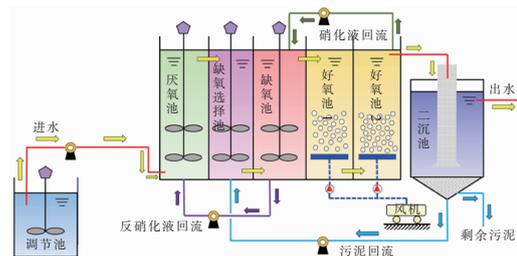


图 1 BBSNP 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of BBSNP process

### 1.2 运行参数

实验开展于 BBSNP 工艺完成启动并进入稳定期后,进水流量为 3.8 m<sup>3</sup>/h,设计总水力停留时间(HRT)为 9.35 h。反应池前设有调节池,并在调节池内设置搅拌器,池体共分为 5 个反应池,对应的设计 HRT 如下:厌氧池为 1.66 h、缺氧选择池为 0.41 h、缺氧池为 2.28 h、好氧池 1 为 2.69 h、好氧池 2 为 2.31 h。反硝化液回流比为 150%,硝化液回流比为 200%,污泥回流比为 100%,好氧池 DO 浓度控制在 2.0 ~ 3.0 mg/L。在不同运行阶段,通过调节剩余污泥排放量将 SRT 分别控制在 7 d 和 15 d,对应的 MLSS 分别为 2 247 ~ 2 356、3 400 ~ 3 500 mg/L。

### 1.3 实验水质

实验原水为该污水处理厂沉砂池末端出水,水温在 20 °C 左右,pH 值为 7.09 ~ 7.30(平均值为 7.21),其他水质指标见表 1。

## 1.4 分析项目与方法

COD:连华试剂快速消解法;BOD<sub>5</sub>:稀释接种法;总氮:过硫酸钾消解-紫外分光光度法;氨氮:纳氏试剂分光光度法;总磷:钼酸盐分光光度法;pH值:哈希 HQ11d pH 仪;MLSS:哈希便携式悬浮物监测仪;DO 浓度:哈希 HQ30D 便携式溶解氧仪。

## 1.5 计算方法

### ① 缺氧吸磷率( $X$ )

缺氧吸磷率( $X$ )是指在缺氧池磷酸盐吸收量占系统总的磷酸盐吸收量的比例,计算方法如下:

$$S = C_{\text{缺}} - \frac{C_{\text{灰}}(1+A) + C_{\text{好}}(B+C)}{1+A+B+C} \quad (1)$$

$$X = \frac{S(1+A+B+C)}{C_{\text{灰}}(1+A) + C_{\text{好}}(B+C)} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $S$  指缺氧池的磷酸盐吸收量,mg/L; $C_{\text{灰}}$ 、 $C_{\text{缺}}$ 、 $C_{\text{好}}$  分别指厌氧池、缺氧池和好氧池 2 出水的磷酸盐浓度,mg/L; $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别指反硝化液回流比、污泥回流比、硝化液回流比。

### ② 厌氧释磷倍数( $Y$ )

厌氧释磷倍数( $Y$ )是指厌氧池出水磷酸盐浓度与厌氧池进水磷酸盐浓度之比,计算方法如下:

$$Y = \frac{C_{\text{灰}}(1+A)}{C_{\text{进}} + AC_{\text{缺}}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{进}}$  指装置进水中的磷酸盐浓度,mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SRT 对系统 COD 去除效果的影响

不同 SRT 条件下系统对 COD 的去除效果如图 2 所示。

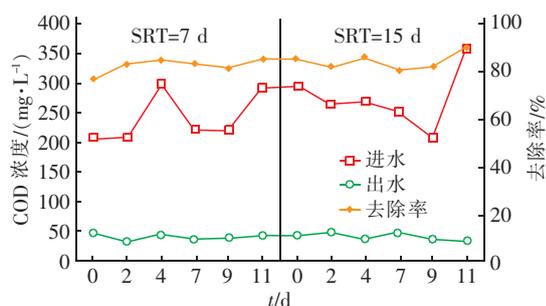


图 2 SRT 对系统 COD 去除率的影响

Fig. 2 Effect of SRT on COD removal rate of system

由图 2 可知,提高 SRT 并未对系统的 COD 去除效果产生明显影响,两种 SRT 条件下系统出水 COD 平均浓度均为 41 mg/L 左右,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A

标准。在提高 SRT 后的第 11 天,系统的 COD 去除率有一个明显的上升趋势,这是由于实际进水 COD 浓度在这一天有一定的升高,而 BBSNP 系统具有一定的抗冲击负荷能力,对 COD 仍可以保持较好的去除效果,出水 COD 浓度仍与之前保持一致,故而 COD 去除率有所升高。

不同 SRT 条件下沿程各反应池的 COD 浓度如图 3 所示。可以看到,提高系统 SRT 后,厌氧池出水 COD 浓度明显下降。当 SRT 分别为 7、15 d 时,厌氧池的 COD 去除率分别为 62.37%、80.32%,这表明提高系统的 SRT 可使 COD 在厌氧池的利用率也相应提高。这是因为,SRT 的提高使系统的污泥浓度相应提高,降低了厌氧池的污泥负荷,更多的聚磷菌、反硝化聚磷菌在厌氧池内利用进水中的 VFA 合成内碳源 PHAs 存于体内。

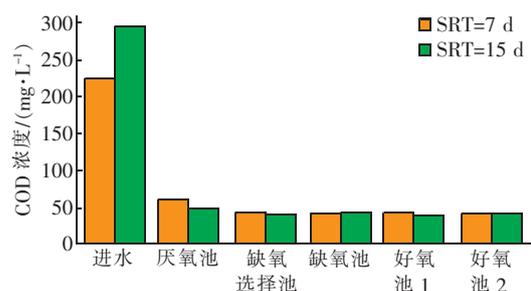


图 3 SRT 对不同反应池 COD 浓度的影响

Fig. 3 Effect of SRT on COD concentration in different reaction tanks

有研究发现,厌氧池出水 COD 浓度的降低将有利于反硝化聚磷菌在系统内发挥反硝化除磷作用<sup>[5]</sup>。当缺氧选择池、缺氧池内存在大量外碳源时,会导致普通反硝化菌与反硝化聚磷菌的竞争,普通反硝化菌会优先利用外碳源进行反硝化<sup>[6]</sup>,反硝化聚磷菌的反硝化作用会受到抑制;当缺氧选择池、缺氧池的外碳源浓度较低时,普通反硝化菌的生长会受到抑制,而反硝化聚磷菌可以利用内碳源 PHAs 为电子供体,以硝酸盐、亚硝酸盐为电子受体进行反硝化除磷,没有了普通反硝化菌的竞争作用,反硝化聚磷菌更具有优势。所以 SRT 的提高优化了系统各个反应池对 COD 的利用情况,有利于反硝化聚磷菌发挥作用。

### 2.2 SRT 对系统总磷去除效果的影响

图 4 为不同 SRT 条件下系统出水总磷浓度的变化。可知,在提高 SRT 前后 BBSNP 工艺出水总磷

浓度以及去除率均未发生明显变化,出水总磷浓度均小于 0.3 mg/L,可以稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水质标准。

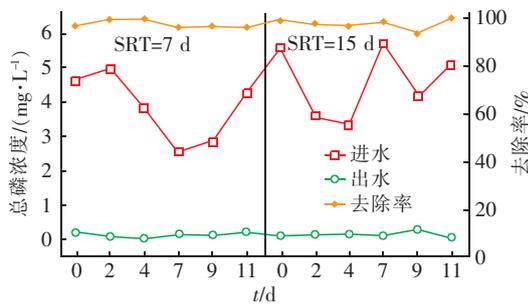


图 4 SRT 对系统总磷去除效果的影响

Fig. 4 Effect of SRT on TP removal in system

图 5 为不同 SRT 条件下系统沿程各反应池的磷酸盐浓度及缺氧吸磷率变化情况。可知, SRT 对系统的除磷特性有较大影响。系统中反硝化聚磷菌的富集程度随着 SRT 的提高而有所提升。在提高 SRT 后, 缺氧池出水的磷酸盐浓度有了明显的下降。当 SRT = 7 d 时, 缺氧池出水磷酸盐浓度保持在 1.908 ~ 2.488 mg/L, 均值为 2.144 mg/L, 缺氧吸磷率为 30.1% ~ 41.6%, 均值为 33.9%; 当 SRT = 15 d 时, 缺氧池出水磷酸盐浓度下降到了 0.116 ~ 1.023 mg/L, 均值为 0.628 mg/L, 缺氧吸磷率为 62.6% ~ 97.1%, 均值为 77.9%。SRT 的提高使系统的缺氧吸磷率明显提高, 说明系统内富集到了更多的反硝化聚磷菌, 在总磷的去除中发挥了更大的作用。同时, 缺氧吸磷率的提高意味着系统内更多的磷酸盐在缺氧池内被去除, 降低了好氧池的曝气量, 降低了能耗。

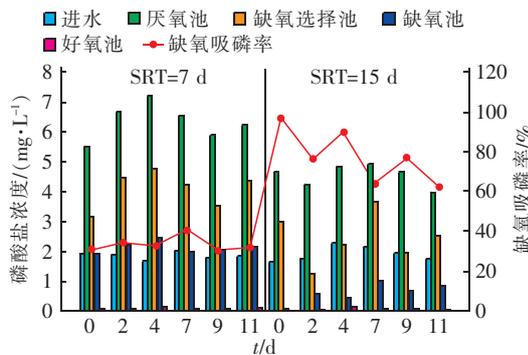


图 5 SRT 对系统沿程磷酸盐浓度及缺氧吸磷率的影响

Fig. 5 Effect of SRT on phosphate concentration in each reaction tank and anoxic phosphorus uptake rate

同时, 在提高系统 SRT 后厌氧池内磷酸盐浓度

有所下降, 这是因为缺氧池出水磷酸盐浓度的下降, 使随着混合液回流到厌氧池的磷酸盐量也随之减少。通过式(3)计算系统的厌氧释磷倍数, 可得当 SRT = 7 d 时厌氧释磷倍数为 3.11 倍, 当 SRT = 15 d 时厌氧释磷倍数为 4.13 倍。在提高 SRT 后系统的污泥浓度随之增加, 系统内聚磷菌、反硝化聚磷菌的数量增加, 系统的厌氧释磷效果也会更好。

### 2.3 SRT 对系统脱氮效果的影响

图 6 为不同 SRT 条件下系统的总氮去除效果。可知, 当 SRT 提高到 15 d 后, 系统对总氮的去除率有所升高。当 SRT = 7 d 时, 系统出水总氮平均值为 9.530 mg/L, 总氮平均去除率为 68.27%; 当 SRT = 15 d 时, 系统出水总氮平均值为 6.864 mg/L, 总氮平均去除率为 74.05%。系统反硝化效果的提高, 是因为反硝化聚磷菌具有较长的世代周期<sup>[7]</sup>, 较长的污泥龄更适合反硝化聚磷菌的生存。同时系统污泥浓度的提高, 使得反硝化聚磷菌在反应器内得到了富集。这些条件的改变均有利于反硝化聚磷菌的生长, 所以提高 SRT 后系统内反硝化聚磷菌的丰度也有所提高, 污泥负荷降低。

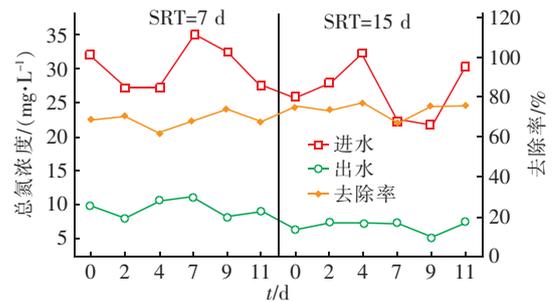


图 6 SRT 对系统总氮去除效果的影响

Fig. 6 Effect of SRT on TN removal in system

另一方面, 反硝化聚磷菌可以在吸收磷酸盐的同时完成硝酸盐的去除, 田文德<sup>[1]</sup>的研究表明, 反硝化聚磷菌在缺氧区的磷酸盐吸收量和硝酸盐去除量存在一定的线性关系, 而在本研究中, 由上述分析可得, SRT 的提高使系统富集到了更多的反硝化聚磷菌, 提高了系统的缺氧吸磷率, 从而在缺氧池去除了更多的磷酸盐, 这样就可以同时使得有更多的硝酸盐氮和亚硝酸盐氮在缺氧池反硝化聚磷菌利用内碳源 PHAs 进行还原, 节省了系统的碳源, 突出了 BBSNP 工艺“一碳两用”的优势<sup>[8]</sup>, 并使系统缺氧池出水的硝酸盐浓度降低, 进而保证了系统最终出水总氮浓度的降低。

### 3 结论

① 在 BBSNP 工艺中,将 SRT 由 7 d 提高到 15 d 后,系统的 COD 去除效果没有明显变化,出水 COD 可以稳定达到国家一级 A 标准。厌氧池中 COD 的利用率由 62.37% 提高到 80.32%,表明 SRT 的提高有利于反硝化聚磷菌的富集。

② 提高 SRT 后,出水 TP 浓度及去除率变化不大,出水 TP 始终低于 0.3 mg/L,达到了地表水 IV 类标准;系统的厌氧释磷倍数由 3.11 倍提高到 4.13 倍,缺氧吸磷率由 33.9% 提高到 77.9%,更好地发挥了反硝化聚磷菌“一碳两用”的效能,降低了碳源需求,同时减少了系统的曝气能耗。

③ 提高 SRT 可降低系统出水 TN 浓度,TN 去除率由 68.27% 提高到了 74.05%,增强了系统对 TN 的去除效能。

综上所述,SRT 会对 BBSNP 工艺的反硝化脱氮除磷特性产生较大的影响。在一定范围内,系统内反硝化聚磷菌的富集程度会随着 SRT 的提高而提高。将 BBSNP 工艺的 SRT 控制在 15 d 左右,有利于系统富集到更多的反硝化聚磷菌,更好地发挥其“一碳两用”的效能,保证出水水质达标,同时降低系统的运行能耗。

### 参考文献:

- [1] 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.  
Tian Wende. Study on the Performance of BBSNP Process and Phosphorus Removal Characteristics of Denitrifying Phosphorus-accumulating Organisms[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [2] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. Water Sci Technol, 1993, 27(5/6): 241 - 252.
- [3] 韩京龙. 低温下 BBSNP 工艺除磷脱氮效能分析及调控[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
Han Jinglong. Analysis and Regulation of Phosphorus and Nitrogen Removal Efficiency in BBSNP Process at Low Temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [4] Zhou N, Dang C, Zhao Z, et al. Role of sludge retention time in mitigation of nitrous oxide emission from a pilot-

scale oxidation ditch[J]. Bioresour Technol, 2019, 292: 121961.

- [5] Qin Z, Qiu L, Zhang S, et al. Enrichment of denitrifying phosphate-accumulating organisms in nitrogen and phosphorus removal process[A]. Proceedings of the 2015 4th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering [C]. Paris: Atlantis Press, 2016.
- [6] 黄靓,郭海燕,刘小芳. 反硝化聚磷菌的培养及其脱氮除磷特性[J]. 化工环保, 2019, 39(2): 158 - 162.  
Huang Liang, Guo Haiyan, Liu Xiaofang. Cultivation of denitrifying phosphorus accumulating organisms and their characteristics of nitrogen and phosphorus removal[J]. Chemical Industry and Engineering, 2019, 39(2): 158 - 162 (in Chinese).
- [7] Xu H, Jin R, Zhang C, et al. Isolation and identification of an aerobic denitrifying phosphorus removing bacteria and analysis of the factors influencing denitrification and phosphorus removal [J]. Water Sci Technol, 2018, 78(11): 2288 - 2296.
- [8] 张卉. 基于生物选择器改良 A<sup>2</sup>/O 工艺除磷脱氮效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
Zhang Hui. Research on Phosphorus and Nitrogen Removal by Modified A<sup>2</sup>/O Process Based on Biological Selector [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).



作者简介:李伟光(1962 - ),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为城镇饮用水水质安全保障、污(废)水处理与资源化以及固体废弃物减量化与资源化。

E-mail: hitlw@126.com

收稿日期:2019 - 11 - 20