

文章编号:1673-1689(2007)02-0071-05

## 反硝化除磷工艺研究

邹华, 阮文权, 陈坚

(江南大学 工业生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 研究了反硝化除磷工艺的运行效果。结果表明, 此反硝化除磷工艺可以较好地进行除磷脱氮, 但是磷的去除对进水氮的浓度有一定的要求。在进水 COD 400 mg/L, 总磷 15 mg/L, 氨氮 84 mg/L 的条件下 COD 的降低率可达 96% 以上, 氮的去除率稳定在 86%~88%, 磷的去除率为 92%~95%。进水氨氮质量浓度为 60 mg/L 时, 磷的去除率为 78%, 在进水氨氮质量浓度降为 44 mg/L 时磷的去除率降为 68%。反硝化除磷比以氧为电子受体的生物除磷可减少耗氧 55.5%, 剩余污泥的产生量可减少 53%, 温室气体 CO<sub>2</sub> 的产生量可减少体积分数 21.4%。

**关键词:** 废水处理; 强化生物除磷(EBPR); 反硝化除磷; 除磷脱氮

**中图分类号:** X 703

**文献标识码:** A

## Study of Denitrifying Dephosphatation Process

ZOU Hua, RUAN Wen-quan, CHEN Jian

(Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Southen Yangtze University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** A denitrifying dephosphatation process was operated in this study. The results showed that the denitrifying dephosphatation process could remove phosphorus and nitrogen successfully at an adequate concentration of nitrogen in inflow. Above 96% COD was removed when the inflow COD, total phosphorus (TP) and ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N) were 400 mg/L, 15 mg/L and 84 mg/L respectively, 86%~88% nitrogen and 92%~95% phosphorus was removed simultaneously. But when the inflow NH<sub>3</sub>-N was 60 mg/L, 78% phosphorus was removed, once the inflow NH<sub>3</sub>-N dropped to 44 mg/L, only 68% phosphorus was removed in the system. In the system used nitrate as electron acceptor, the oxygen consumption was 55.5% less than the system that oxygen was used as electron acceptor. The sludge and CO<sub>2</sub> production was 53% and 21.4% less, respectively.

**Key words:** wastewater treatment; Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR); denitrifying dephosphatation; phosphorus and nitrogen removal

研究废水除磷技术, 控制磷的排放, 保护水体不受富营养化的影响是一个亟待解决的问题。目前一个使用很广的处理方法是强化生物除磷(EBPR), 其利用聚磷菌在“压抑”(如: 厌氧)条件下能利用分解体内聚磷酸盐产生的能量, 将碳源合成

聚羟基烷酸(PHA)的形式储存, 同时释放磷酸盐<sup>[1]</sup>。在随后存在电子受体(如: 氧)的条件下能吸收比所释放的更多的磷合成聚磷酸盐颗粒并储存于胞内, 并通过排放剩余污泥达到从废水中除磷的目的。废水生物除磷工艺是一项高效低能耗的废

收稿日期: 2006-04-15.

作者简介: 邹华(1972-), 男, 江苏无锡人, 工学博士, 主要从事废水生物技术处理方面的研究. Email: zouhua@sytu.edu.cn

水处理技术,它在有效去除废水中有机污染物的同时起到除磷效果,受到人们的普遍重视。

强化生物除磷的大量研究结果都证实,硝酸盐也可以被聚磷菌用作最终电子受体进行生物除磷<sup>[2-3]</sup>,即反硝化除磷。由于反硝化除磷不需要氧,并能做到“一碳两用”,降低除磷脱氮对碳源的需求量<sup>[4]</sup>。因此,对于解决目前废水处理中除磷脱氮碳源(COD)不足的问题,以及降低曝气及运行费用都有很重要的意义,而且其还可减少污泥和温室气体CO<sub>2</sub>的产生<sup>[5-6]</sup>。

作者对根据反硝化除磷原理组合的反硝化除

磷工艺流程的运行效果进行了一些初步研究,并从理论上对反硝化除磷工艺和厌氧/好氧除磷工艺的耗氧量、污泥产生量及CO<sub>2</sub>产生量进行了比较。

## 1 实验装置和方法

### 1.1 实验装置及流程

实验所用系统由厌氧池、1#沉淀池、好氧池、2#沉淀池、缺氧池和3#沉淀池组成,如图1所示。其中,厌氧区有效容积为3.65 L,好氧区及缺氧区为5.12 L,沉淀池都为2.1 L。进水体积流量1.4 L/h,厌氧区水力停留时间2.5 h,好氧区及缺氧区的为4 h。

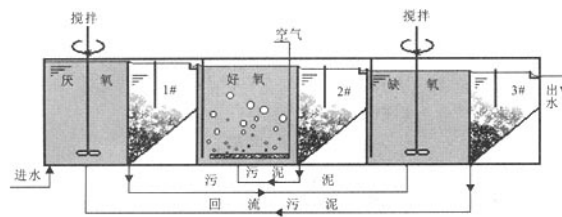


图1 实验装置示意图

Fig. 1 The experimental system sketch map

### 1.2 实验用水及接种污泥

**1.2.1 实验用水** 实验用水为人工合成废水,废水成分同文献[1-3]:COD 400 mg/L; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 15 mg/L;pH 7.0;氨氮浓度因需要而改变。

**1.2.2 接种污泥** 接种污泥为经驯化有高效除磷效果的污泥。接种后系统中MLSS为4.0 mg/L。

### 1.3 实验装置的运行控制

反硝化除磷工艺流程共运行近半年的时间(163 d)。期间分为2个阶段:

第1阶段(启动阶段)78 d:启动运行了反硝化工艺。平均进水COD 400 mg/L,总磷15 mg/L,氨氮84 mg/L。

第2阶段(运行阶段)85 d:运行了反硝化工艺。进水COD和总磷浓度不变,改变进水氨氮质量浓度为60 mg/L,44 mg/L,90 mg/L,84 mg/L。

运行中控制污泥龄10 d。

### 1.4 分析项目及测试方法

COD:采用5B-1型COD快速测定仪测定;NO<sub>3</sub>-N:酚二磺酸光度法<sup>[7]</sup>;TP:采用钼锑抗分光光度法测定<sup>[7]</sup>;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:纳氏试剂光度法<sup>[7]</sup>;MLVSS:采用重量法测定<sup>[7]</sup>;MLSS:采用重量法测定<sup>[7]</sup>;SV:30 min沉降法;SVI:采用标准方法测定

$$\left(\frac{SV_{30}}{m}\right)。$$

万方数据

## 2 结果与讨论

### 2.1 反硝化除磷工艺的运行

**2.1.1 启动阶段** 流程在厌氧池后有个沉淀池,污泥和废水经过厌氧阶段后进入沉淀池。沉淀后清液进入好氧池进行硝化,沉淀污泥进入缺氧池进行反硝化除磷。这样好氧池中只进行好氧硝化作用,其所需的曝气量只需满足硝化的要求即可,所有磷的去除都是在缺氧条件下去除的。此流程可进一步减少除磷脱氮对曝气和碳源的要求。流程中硝化污泥和除磷污泥分开为两个独立的污泥循环流,可分别进行控制泥龄、MLSS等,以满足硝化和除磷的不同需要。

反硝化除磷系统的启动运行获得了较好的除磷脱氮效果。图2、3和4是运行结果图。COD、总磷、总氮在经过60 d的启动运行后都获得了稳定的、很好的去除。COD的降低率随着时间的推移逐渐提高,最终稳定在96%以上。总磷的去除率从51%提高至92%~95%。总氮的去除率从53%逐渐提高,60 d后稳定在86%~88%。可见,经过60 d以上的启动后,系统能够很好的去除COD和氮磷,去除率都超过或接近90%。

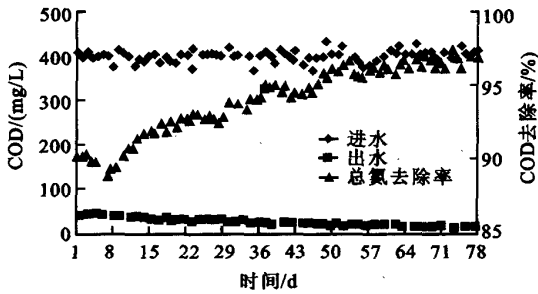


图 2 COD 的去除情况

Fig. 2 The removal of COD

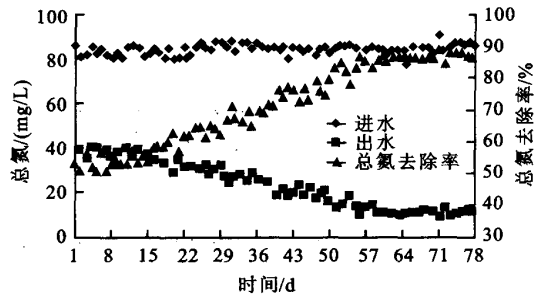


图 4 总氮的去除情况

Fig. 4 The removal of nitrogen

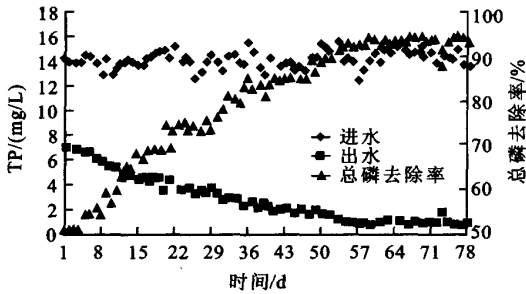


图 3 总磷的去除情况

Fig. 3 The removal of total phosphate

2.1.2 运行阶段 图 5~7 和表 1 为反硝化除磷工艺在进水氨氮平均质量浓度分别是 60 mg/L, 44 mg/L, 90 mg/L, 84 mg/L 的条件下的运行结果。由图可知在所有进水氨氮质量浓度条件下, COD 一

直有很好的降低效果, 稳定在 96%~98%, 氮的去除率也较为稳定, 在 83%~89% 之间稍有波动。磷的去除情况由于进水氨氮质量浓度的不同有较大的波动。在进水氨氮质量浓度降为 60 mg/L 时, 磷的去除率降为 45%, 后逐渐提高至 78%; 在进水氨氮质量浓度降为 44 mg/L 时, 磷的去除率降为 30%, 后逐渐提高至 68%; 当氨氮质量浓度变为 90 mg/L 时, 磷的去除率为 80%, 后逐渐提高至 94%。可见反硝化除磷系统能够有效地去除废水中的 COD 和氮磷。磷的去除与进水中氮的含量有关, 进水含有足够的氮才能够保证反硝化除磷所需的电子受体( $\text{NO}_3^-$ )的量。因此反硝化除磷工艺适用于原水含氮量较高的废水, 对于原水含氮量较少的废水需在处理中适当地添加氮, 才能很好地运行此工艺。



图 5 COD 的降低情况

Fig. 5 The removal of COD

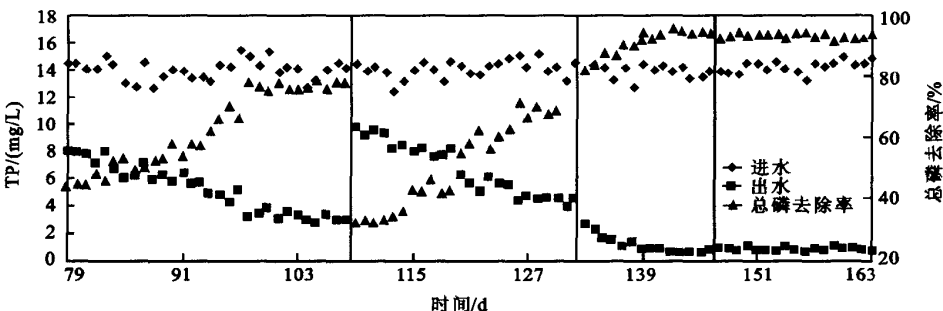


图 6 总磷的去除情况

Fig. 6 The removal of total phosphate

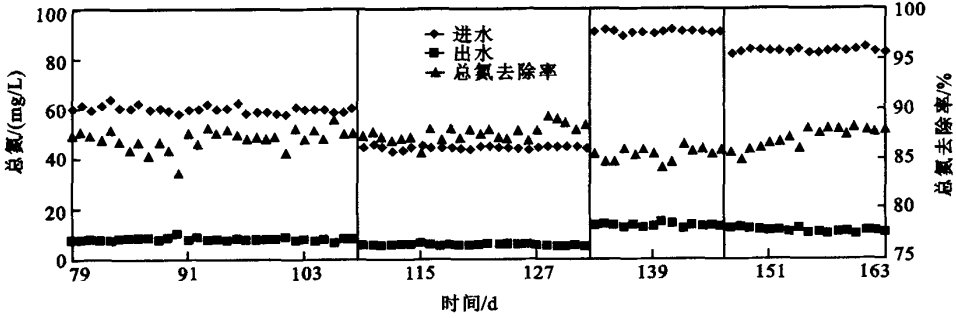


图7 总氮的去除情况

Fig. 7 The removal of nitrogen

表1 反硝化除磷工艺的运行结果

Tab. 1 COD, phosphorus, nitrogen, MLSS concentration and SVI in different part of denitrifying dephosphatation system

日期	项目/ (mg/L)	进水	厌氧池	好氧池	缺氧池 (反硝化 除磷)	去除 率/%
第102天	COD	385	35.6	8	9	97.7
	TP	14.2	67.5	65.3	3.5	75.4
	氨氮质量 浓度	60.6	56.8	0	6.2	88.0
	硝基氮 质量浓度	1.1	0	52.0	1.1	
	MLSS	/	3.65	3.43	3.78	/
	SVI	/	72.5	84.5	74.6	/
第130天	COD	397	39.8	17.5	15	96.2
	TP	14.2	82.6	73.6	4.6	67.6
	氨氮 质量浓度	44.9	45.8	0	5.12	88.6
	硝基氮 质量浓度	0	0	43.6	0	
	MLSS	/	4.01	4.56	4.02	/
	SVI	/	44.2	65.3	45.6	/
第145天	COD	400	40.2	10	9	97.8
	TP	13.5	89.3	86.9	0.8	94.1
	氨氮 质量浓度	89.8	83.5	0	12.0	85.3
	硝基氮 质量浓度	2.3	0	79.6	1.2	
	MLSS	/	3.98	4.45	3.98	/
	SVI	/	50.6	64.7	50.8	/
第161天	COD	400	36.5	7	8.3	97.9
	TP	14.2	89.8	88.2	1	93.0
	氨氮 质量浓度	84.4	80.2	0	10.3	87.8
	硝基氮 质量浓度	0	0	77.9	0	
	MLSS	/	4.01	4.43	3.97	/
	SVI	/	56.8	65.7	56.6	/

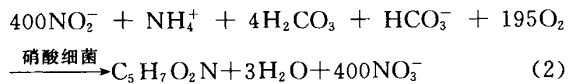
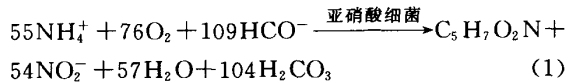
2.2 反硝化除磷工艺与厌氧/好氧除磷工艺的比较

根据 Smolders 的生物除磷过程好氧代谢的化学量模型,每去除 0.04 mol 磷需消耗 0.55 mol O<sub>2</sub>,同时产生 0.34 mol 生物量,消耗 0.59 mol CO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>。而根据 Kuba 的生物除磷过程缺氧代谢的化学量模型,在利用硝酸盐为最终电子受体的反硝化除磷过程中,每去除 0.04 mol 磷需消耗硝酸盐 0.58 mol,不需要消耗氧,同时产生 0.16 mol 生物量,消耗 0.75 mol CO<sub>2</sub><sup>[9]</sup>。

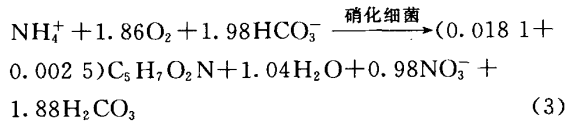
2.2.1 耗氧量的比较

(1) 除磷耗氧量:好氧代谢每去除 1 mg 磷需耗氧 14.20 mg,而缺氧代谢每去除 1 mg 磷只需消耗硝酸盐 6.55 mg,不需要消耗氧。

(2) 硝化耗氧量:好氧条件下的生物硝化过程分两步进行:首先是亚硝酸盐细菌将氨氮转化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>,然后由硝酸盐细菌将 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 进一步氧化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。反应式如下:



式(1)与式(2)合并得下式



由式(1),氧化 1 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,需要 3.16 mg O<sub>2</sub>。由式(2),氧化 1 mg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,需要 1.11 mg O<sub>2</sub>。即硝化反应转化 1 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,共需氧 4.27 mg(不考虑硝化过程中硝化细菌的增殖)。

由此,在不考虑硝化过程中硝化细菌的增殖的情况下,1 L COD 为 400 mg/L,氨氮质量浓度 40

mg/L,总磷 15 mg/L 的废水除磷脱氮的理论耗氧:以氧为电子受体时,硝化需要耗氧 170.8 mg,除磷需要耗氧 213 mg,共需耗氧 383.8 mg;以硝酸盐为电子受体时,硝化耗氧 170.8 mg。每去除 15 mg 磷反硝化除磷可减少耗氧 213 mg,即每去除 1 g 磷耗氧降低了 55.5%。

**2.2.2 污泥产生量的比较** 污泥的分子式可表示为  $\text{CH}_{2.09}\text{O}_{0.54}\text{N}_{0.20}\text{P}_{0.015}$ ,摩尔质量为 26 g/mol。以氧为电子受体的除磷工艺每去除 0.04 mol 磷产生 0.34 mol 生物量,则每去除 1 g 磷产生剩余污泥 7.13 g;以硝酸盐为电子受体的工艺每去除 0.04 mol 磷产生 0.16 mol 生物量,则每去除 1 g 磷产生剩余污泥 3.35 g。每去除 1 g 磷反硝化除磷可少产生污泥 3.78 g,减少了 53%。

**2.2.3  $\text{CO}_2$ 产生量的比较** 以氧为电子受体的除磷工艺每去除 0.04 mol 磷消耗 0.59 mol  $\text{CO}_2$ ,即每去除 1g 磷消耗  $\text{CO}_2$  20.9 g;以硝酸盐为电子受

体的工艺每去除 0.04 mol 磷消耗 0.75 mol  $\text{CO}_2$ ,即每去除 1g 磷消耗  $\text{CO}_2$  26.6 g。每去除 1 g 磷反硝化除磷可多消耗  $\text{CO}_2$  5.7 g,减少  $\text{CO}_2$  21.4%。

### 3 结 论

反硝化除磷可以较好地进行除磷脱氮,但是磷的去除对进水氮的浓度有一定的要求。在进水 COD 400 mg/L,总磷 15 mg/L,氨氮 84 mg/L 的条件下 COD 的降低率可达 96%以上,氮的去除率稳定在 86%~88%,磷的去除率为 92%~95%。进水氨氮质量浓度为 60 mg/L 时,磷的去除率为 78%;在进水氨氮质量浓度降为 44 mg/L 时,磷的去除率降为 68%。

经理论计算,反硝化除磷比以氧为电子受体的生物除磷可减少耗氧 55.5%,剩余污泥的产生量可减少 53%,产生的温室气体  $\text{CO}_2$  可减少 21.4%。

### 参考文献:

- [1] 阮文权,邹华,陈坚. 乙酸钠为碳源时进水 COD 和总磷对生物除磷的影响[J]. 环境科学,2002,23(3):49-52.  
RUAN Wen-quan, ZOU Hua, CHEN Jian. Effect of the COD and Total Phosphorus Concentration on Biological Phosphorus Removal Supplied with Acetate as a Sole Carbon Source[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2002, 23(3): 49-52. (in Chinese)
- [2] ZOU Hua, DU Guo-Cheng, RUAN Wen-Quan, et al. Role of nitrate in biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* (Accepted).
- [3] 邹华,阮文权,陈坚. 硝酸盐作为生物除磷电子受体的研究[J]. 环境科学研究,2002,15(3):38-41.  
ZOU Hua, RUAN Wen-quan, CHEN Jian. Study of Using Nitrate as Electron Acceptor in Biological Phosphorus Removal[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(3): 38-41. (in Chinese)
- [4] 邹华,阮文权,陈坚. 硝酸盐在除磷脱氮中的作用[J]. 食品与生物技术,2002,21(1):10-14.  
ZOU Hua, RUAN Wen-quan, CHEN Jian. The Role of Nitrate in the Removal of Nitrogen and Phosphate[J]. *Journal of Wuxi University of Light Industry*, 2002, 21(1): 10-14.
- [5] 郝晓地,刘壮,刘国军. 欧洲水环境控磷策略与污水除磷技术(上)[J]. 给水排水,1998,24(8):69-73.  
HAO Xiao-di, LIU Zhuang, LIU Guojun. Policy and technology of phosphorus control and removal in Europe(I)[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 1998, 24(8):69-73. (in Chinese)
- [6] 郝晓地,刘壮,刘国军. 欧洲水环境控磷策略与污水除磷技术(下)[J]. 给水排水,1998,24(9):68-71.  
HAO Xiao-di, LIU Zhuang, LIU Guo-jun. Policy and technology of phosphorus control and removal in Europe(II)[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 1998, 24(9):68-71.
- [7] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 第三版. 北京:中国环境科学出版社,1989.
- [8] Smolders G J F, Van der Meij J, Van Loosdrecht M C M, et al. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, 44(7): 837-848.
- [9] Kuba T, Murnleitner E, Van Loosdrecht M C M, et al. A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, 52(6): 685-695.

(责任编辑:杨萌)