

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0706

郭意,熊峰,张洪,等.2016.填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺污水处理及反硝化除磷效能[J].环境科学学报,36(6):2020-2026

Guo Y, Xiong F, Zhang H, et al. 2016. Fiber carrier A<sup>2</sup>/O process treating domestic wastewater and denitrifying phosphorus removal efficiency[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(6):2020-2026

## 填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺污水处理及反硝化除磷效能

郭意<sup>1</sup>,熊峰<sup>1</sup>,张洪<sup>2</sup>,李永峰<sup>1,\*</sup>,任南琪<sup>2,\*</sup>

1. 东北林业大学 林学院,哈尔滨 150040

2. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室,哈尔滨 150090

收稿日期:2015-07-16 修回日期:2015-10-18 录用日期:2015-10-19

**摘要:**填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺是在 A<sup>2</sup>/O 工艺的基础上通过向厌氧池、缺氧池、好氧池中投加醛化纤维式组合填料,将传统活性污泥法与生物膜法相结合组成一套脱氮除磷的新系统,文章对填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺与传统 A<sup>2</sup>/O 工艺处理生活污水的效果进行了对比研究,以及对复合式工艺在不同硝化液回流比下反硝化除磷能力进行了分析.研究表明,相同条件下,填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺对生活污水的处理效果要优于传统 A<sup>2</sup>/O 工艺,分别使 COD 和氨氮的去除率达到 92.5% 和 93.1%.试验通过增加硝化液回流比的措施使得反硝化聚磷菌在填料上富集程度增大,当硝化液回流比为 300% 时,缺氧池的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 3.03 mg·L<sup>-1</sup>,吸磷量最大为 26.28 mg·L<sup>-1</sup>,胞内聚合物 PHB 代谢活性最好,利用率最高为 1.32 g·g<sup>-1</sup>·L<sup>-1</sup>.体现了填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺具有显著的反硝化除磷效果.

**关键词:**A<sup>2</sup>/O 工艺;组合填料;硝化液回流比;反硝化除磷

文章编号:0253-2468(2016)06-2020-07 中图分类号:X703 文献标识码:A

## Fiber carrier A<sup>2</sup>/O process treating domestic wastewater and denitrifying phosphorus removal efficiency

GUO Yi<sup>1</sup>, XIONG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, LI Yongfeng<sup>1,\*</sup>, REN Nanqi<sup>2,\*</sup>

1. Northeast Forestry University, Harbin 150040

2. State key laboratory of urban water resource and environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090

Received 16 July 2015; received in revised form 18 October 2015; accepted 19 October 2015

**Abstract:** Fiber carrier A<sup>2</sup>/O process is developed by adding polyvinyl alcohol fiber to the anaerobic, anoxic and aerobic tank in a A<sup>2</sup>/O process by combining biofilm approach into conventional activated sludge process to constitute a new system. Fiber carrier A<sup>2</sup>/O process was compared with traditional A<sup>2</sup>/O process for domestic wastewater treatment, and the effect of different nitrification liquid reflux ratio on denitrifying phosphorus removal was studied. Results show that the fiber carrier A<sup>2</sup>/O process has obvious advantages. The COD and ammonia removal rate reached 92.5% and 93.1%, respectively. Though increasing the nitrification liquid reflux ratio can make the DNPAOs enrich on the carrier. When reflux ratio was increased to 300%, the amount of phosphorus absorption was 26.28 mg·L<sup>-1</sup> and the maximum utilization of PHB was 1.32 g·g<sup>-1</sup>·L<sup>-1</sup> and had the best metabolic activity. The system of fiber carrier A<sup>2</sup>/O was proved to have significant denitrifying phosphorus removal capacity.

**Keywords:** A<sup>2</sup>/O process; fiber carrier media; nitrification liquid reflux ratio; denitrifying phosphorus removal

### 1 引言(Introduction)

目前水体富营养化已成为广受关注的环境问题.水体富营养化主要是由氮磷浓度超标所引起的(Kirilova *et al.*, 2010).针对这一问题,要求污水处理厂的功能逐渐从单一去除有机物为目的转变为既

要去除有机物又要脱氮除磷(Ekama *et al.*, 1999).因此,在不改变工艺基本流程的情况下,通过提高污水处理设施中微生物的富集程度来提高生活污水中污染物的去除率是在当前条件下最行之有效的方法之一(姚红, 2004).

反硝化除磷是一种新型高效低能耗的生物脱

基金项目:黑龙江省自然基金项目(No. E201354)

Supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province(No. E201354)

作者简介:郭意(1989—),女,E-mail: luckguoyi@126.com; \*通讯作者(责任作者)E-mail: dr\_lyf@163.com

Biography: GUO Yi(1989—), female, E-mail: luckguoyi@126.com; \* Corresponding author E-mail: dr\_lyf@163.com

氮除磷技术,其利用反硝化聚磷微生物(DNPAOs)在缺氧环境下以硝酸盐作为最终电子受体,以PHB作为电子供体,通过“一碳两用”途径来实现同步反硝化和过量吸磷(Seviour *et al.*, 2003; 王亚宜, 2005).反硝化除磷缓解了反硝化过程和生物除磷过程对有机碳源需求的矛盾,以及硝化菌和聚磷菌(phosphate accumulating organisms, PAOs)所需最佳污泥龄迥异的矛盾,因此被视为一种可持续的污水处理技术(徐婷, 2010).反硝化除磷与传统生物除磷技术相比,可节省能源和资源,也正是这个原因,上述一系列工艺被誉为适合可持续发展的绿色除磷脱氮工艺(陈靖, 2007).

A<sup>2</sup>/O 工艺作为当今最常用的生物脱氮除磷工艺,已广泛应用于国内外大型污水处理厂,但是 A<sup>2</sup>/O 工艺的缺陷在于硝化菌、反硝化菌和聚磷菌在有机负荷、泥龄以及碳源需求上存在着矛盾和竞争,很难在单一系统中同时获得氮、磷的高效去除(王荣昌, 2014).陈永志等研究发现内循环对 A<sup>2</sup>/O 系统的反硝化除磷有影响(陈永志, 2011).

试验结合醛化纤维式组合填料的优势及对填料应用于生活污水脱氮除磷研究极少的现状,提出了在 A<sup>2</sup>/O 工艺的厌氧池、缺氧池和好氧池中添加醛化纤维式组合填料的设想,将传统活性污泥法与生物膜法相结合组成一套脱氮除磷的新系统.添加生物填料于好氧段可使池内的硝化细菌能够附着在填料上从而增加了污泥龄,提高硝化效率;缩短好氧段的停留时间,而将更长的时间用于厌氧段和缺氧段的释磷和吸磷作用,提高了除磷效率(Peng *et al.*, 2006; Goto *et al.*, 2002; Galil *et al.*, 2009).于缺

氧段可在载体环境下提高回流比,使反硝化聚磷菌富集,强化反硝化除磷现象,无需外加碳源,即可完成“超量”吸磷过程,适合低碳源污水的生化处理,使该系统能稳定运行并更好的进行脱氮除磷.

试验采用醛化纤维作为 A<sup>2</sup>/O 工艺的填料应用于生活污水的处理中,与该试验前期启动完成的传统 A<sup>2</sup>/O 工艺在相同条件下进行对比试验研究,以及对该复合式工艺在不同硝化液回流比系统下富集菌群来提高系统反硝化除磷能力进行了分析和探讨,以期为今后 A<sup>2</sup>/O 工艺的改进和发展提供新的思路 and 方向.

## 2 材料与方法(Materials and methods)

### 2.1 试验装置

试验装置如图 1 所示.装置由有机玻璃制成,由厌氧池、缺氧池、好氧池和二沉池组成.反应器总体积为 52.16 L,通过隔板分为 8 个格室,其中第 1 格室为厌氧区,第 2 格室为缺氧区,后 6 格室为好氧区,三者体积比为 1:1:2.隔板中间有小孔,使得泥水混合物从反应器始端到末端形成有效的推流.二沉池采用竖流式,体积为 26.18 L.试验进水、回流污泥和硝化液回流流量均采用蠕动泵控制.厌氧区和缺氧区采用搅拌桨轻微搅拌使泥水充分混合.好氧区通过固定在格室底端的曝气头进行底部曝气,使曝气更加充分和均匀.曝气量通过气体流量计进行控制,使得好氧区末端的 DO 在 2.0~3.0 mg·L<sup>-1</sup> 之间.反应器中混合液温度通过加热装置控制在 21~22 °C.3 个区域内均匀地布置着醛化纤维式组合填料,体积填充率为 30%.

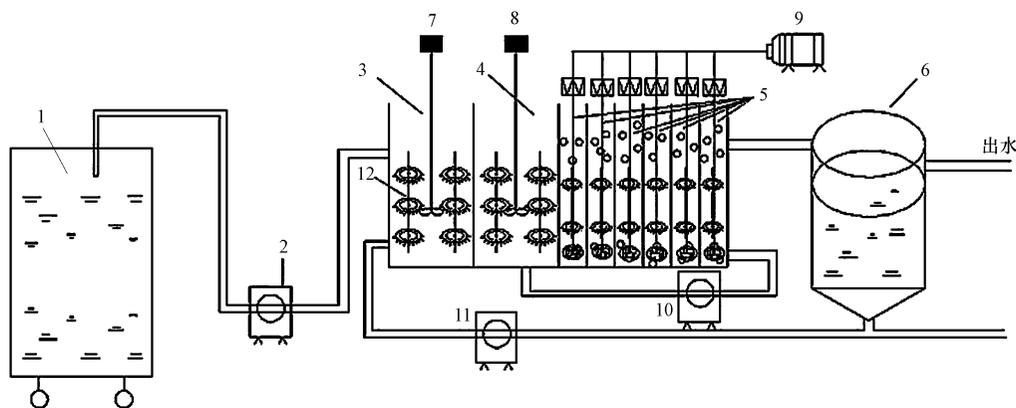


图 1 A<sup>2</sup>/O 工艺流程(1.进水箱;2.蠕动泵;3.厌氧区;4.缺氧区;5.好氧区;6.二沉池;7.搅拌器;8.搅拌器;9.鼓风机;10 混合液回流;11.污泥回流;12.填料)

Fig.1 Flow chart of A<sup>2</sup>/O process

## 2.2 试验条件及接种污泥

试验运行中维持不变的条件如下: HRT 为 8 h, 硝化液回流比为 150%, 污泥回流比为 80%, 污泥停留时间 SRT 通过排泥维持在 15 d 左右. 为了使反应器较快的启动, 试验采用了与 A<sup>2</sup>/O 工艺类似的 A/O 工艺的污泥作为种泥, 其取自哈尔滨市文昌污水处理厂.

## 2.3 试验水质及分析方法

试验进水为模拟生活污水, 通过控制不同的葡萄糖投加量达到不同 COD 值, 投加 NaHCO<sub>3</sub> 来控制进水的 pH. 其他成分为: NH<sub>4</sub>Cl, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O.

水质指标随不同时间段的变化出现一定的波动, 试验期间水质平均指标如表 1 所示.

表 1 试验用水水质

Table 1 Characteristics of influent wastewater

pH	浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )			
	COD	总氮	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
6~8	180~380	50~60	4.0~7.0	48~58

COD: COD-571 型快速测定仪; TN: 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 纳氏试剂光度法; NO<sub>x</sub>-N: 离子色谱法; TP: 钼钒酸光度法; MLSS: 滤纸称重法; pH 值和 DO: WTW340i 在线监测仪; PHB: 气相色谱法.

## 2.4 试验用填料及填料挂膜

醛化纤维式组合填料形状如图 2 所示. 醛化纤维式组合填料结构是将传统的塑料圆片压扣改成双圈大塑料环, 将醛化纤维压在环的环圈上, 使纤维束均匀分布; 内圈是雪花状塑料枝条, 既能挂膜, 又能有效切割气泡, 提高氧的转移速率和利用率. 其性能参数如表 2 所示:

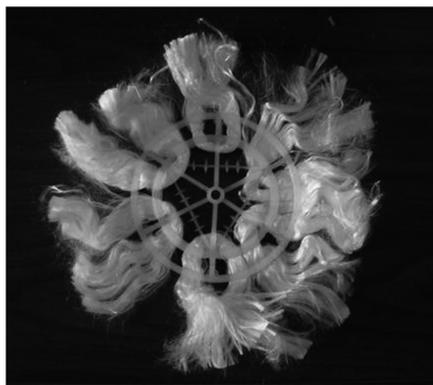


图 2 醛化纤维式组合填料形状

Fig.2 The profile of polyvinyl alcohol fiber

表 2 醛化纤维式组合填料性能参数

Table 2 The characteristics of polyvinyl alcohol fiber

材料	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	中心片直径/mm	单元直径/mm	比表面积/(m <sup>2</sup> ·m <sup>-3</sup> )	单位重量/(kg·m <sup>-3</sup> )
醛化纤维	0.93	73	150	300	2.8

挂膜培养采用连续进水、连续排水的方式, 挂膜第 3 d, 观察醛化纤维表面有一层薄薄的生物膜, 其表面有一定的粘性. 第 9 d, 醛化纤维表面膜附着面积明显增加, 颜色加深. 此时, 对填料上的微生物进行镜检, 发现了大量轮虫、线虫、钟虫等后生动动物, 这些都标志着生物膜的逐渐成熟.

## 3 试验结果与讨论 (Results and discussion)

### 3.1 COD 去除的对比

生物膜逐渐成熟后, 开始进行反应池内各指标的测定, 控制一定的工艺参数, 保持和传统 A<sup>2</sup>/O 相同条件下进行对比. 传统 A<sup>2</sup>/O 工艺与填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺对生活污水 COD 去除效果随时间变化的对比如图 3 所示.

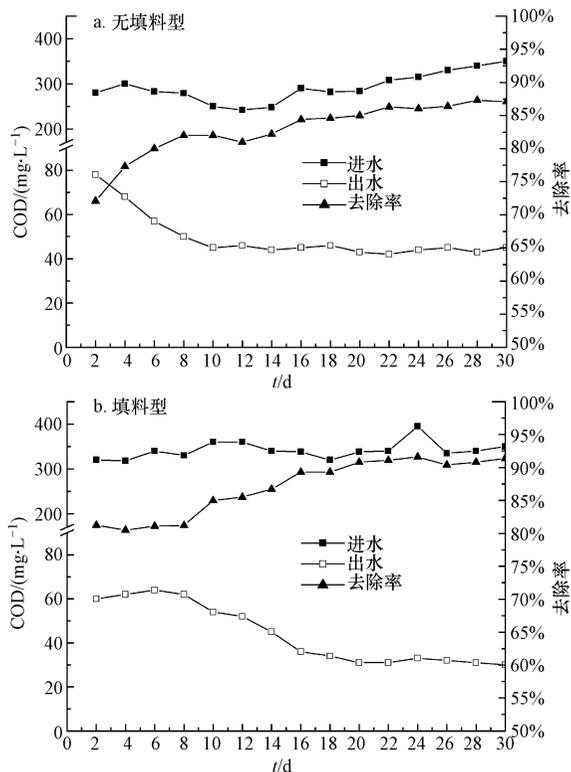


图 3 传统 A<sup>2</sup>/O 工艺与填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺对 COD 去除效果随时间变化

Fig.3 Variation of COD removal efficiency of traditional and carrier A<sup>2</sup>/O process

通过图 3a 与图 3b 的比较可以发现, 传统 A<sup>2</sup>/O

反应器稳定出水是在第 10 d, 填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器稳定出水是在第 16 d, 填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器进入稳定时间较长, 这表明复合反应器处于适应调整阶段, 挂膜不稳定. 但在反应器运行过程中填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器的出水 COD 值始终低于传统 A<sup>2</sup>/O 反应器, 在反应器运行初期差异显著. 在第 30 d, 传统 A<sup>2</sup>/O 出水水质维持在 50 mg·L<sup>-1</sup> 左右, 达不到城市生活污水处理厂污染物一级 A 排放标准, 而填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器出水维持在 40 mg·L<sup>-1</sup> 以下, 满足城镇污水处理厂污染物一级 A 排放标准.

填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器 COD 去除率高于传统 A<sup>2</sup>/O 反应器, 这可能是因为填料上存在生物膜, 微生物活性不断提高, 且微生物在填料上得到了富集. 此时测量膜厚约 0.5 ~ 1.5 mm, MLSS 稳定为 4000 mg·L<sup>-1</sup>. 另外, 从图 3b 中可以看出, 在第 24 d 的时候, 进水 COD 突然抬高, 但是 COD 的去除率并没有太大的变化, 这表明此时复合反应器对有机物已经有了较好的抗冲击负荷能力.

### 3.2 氨氮去除的对比

传统 A<sup>2</sup>/O 工艺与填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺对生活污水氨氮去除效果随时间变化的对比如图 4 所示.

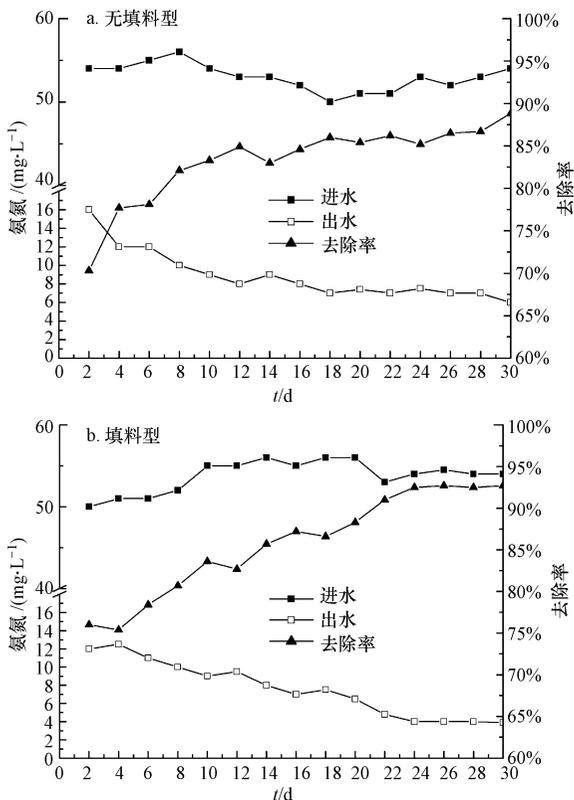


图 4 传统 A<sup>2</sup>/O 工艺与填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺对氨氮去除效果随时间变化

Fig.4 Variation of ammonia removal efficiency of traditional and carrier A<sup>2</sup>/O process

通过图 4a 与图 4b 的比较可以发现, 传统 A<sup>2</sup>/O 反应器进入稳定时间也短于填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器, 且填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器氨氮和 COD 的去除率都呈现先下降后再上升的趋势, 两个指标的下降是因为填料被污泥包裹污泥流失所致, 而两个指标的上升则因填料上生物膜的增殖所致, 这样就完成了活性污泥法向膜法硝化的转化过程. 传统 A<sup>2</sup>/O 反应器在第 16 d 稳定出水, 出水氨氮浓度高于 6 mg·L<sup>-1</sup>, 而填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器在运行前期氨氮去除率波动, 表明填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器的挂膜初期阶段不稳定, 反应器运行到第 22 d 稳定出水, 出水氨氮浓度在 4 mg·L<sup>-1</sup> 以下, 去除率达到 90% 以上. 这表明填料上能够增加池中生物量, 富集硝化菌, 显著提高氨氮的去除效果. 填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器 COD 和氨氮去除率均高于传统 A<sup>2</sup>/O 反应器, 当醛化纤维表面的生物膜形成后 MLSS 稳定为 4000 mg·L<sup>-1</sup>, 传统 A<sup>2</sup>/O 反应器 MLSS 为 2100 mg·L<sup>-1</sup>, 反应器富集微生物总量要多于传统 A<sup>2</sup>/O 反应器, 可以去除更多的污染物.

### 3.3 填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器缺氧池相应水质变化

通过图 5 可以得出, 在填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器启动初期, 磷酸盐的去除率较低, 但对应的硝酸盐的去除率却很高, 这说明在启动初期反硝化菌占主导地位. 体系在 10 d 后除磷率逐渐升高, 这表明反硝化聚磷菌通过适应后数量在不断增加, 从而使磷酸盐去除率不断增加. 在第 50 d 缺氧区除磷效果达到 85%. 所以, 正常运行的填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺中存在反硝化除磷现象. 郝晓地等认为, 反硝化除磷菌是一种广泛存在于一些强化生物除磷工艺中的聚磷菌, 无需特殊培养(郝晓地, 2008).

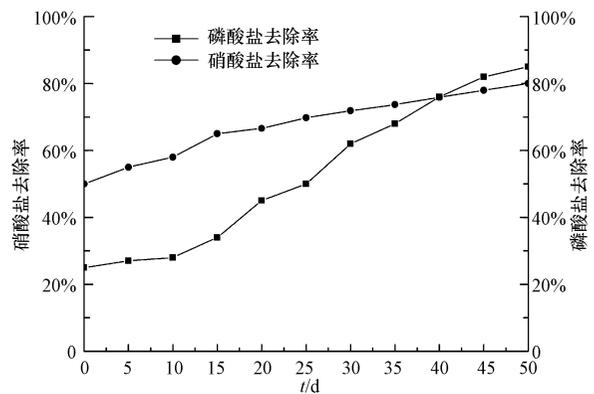


图 5 厌氧/缺氧运行下磷酸盐和硝酸盐去除率的变化过程

Fig.5 The change of phosphate and nitrate removal efficiency under anaerobic/anoxic conditions

通过图 5 还可以得出, 在种泥中确实存在一部

分反硝化聚磷微生物可以利用硝酸盐作为电子受体,在组合填料上富集强化后,反硝化聚磷菌可逐渐成为聚磷污泥中的优势菌种.这也符合 Kuba 等从动力学性质上对好氧聚磷菌和反硝化聚磷菌的比较,认为以硝酸盐作为电子受体的反硝化聚磷菌有着和好氧聚磷菌同样高的强化生物除磷性能(Kuba *et al.*, 1993).

### 3.4 硝化液回流比对缺氧吸磷效果的影响

硝化液回流是 A<sup>2</sup>/O 系统重要的控制参数,硝化液回流的作用在于向缺氧区提供硝态氮从而作为反硝化除磷的电子受体,再结合填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺的特点,通过适当调整工艺参数使得反硝化聚磷菌(DNPAO)在纤维填料上富集程度增大,那么可采用增加混合液回流比的措施,以便于在缺氧段为聚磷菌提供足够的电子受体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,使反硝化聚磷菌的活性最高,使缺氧吸磷量达到最大.

硝化液回流比对缺氧吸磷效果的影响见表 3.由于不同回流比下,缺氧区的 MLSS 不同,所以单位质量污泥的反硝化除磷量  $\Delta\rho(P_{\text{缺}})/\rho(\text{MLSS}_{\text{缺}})$  可以反映除磷效果.回流比从 150% 增加到 300% 时,  $\Delta\rho(P_{\text{缺}})/\rho(\text{MLSS}_{\text{缺}})$  的值呈现上升趋势,当回流比增加到 300% 时,缺氧区出水硝酸盐浓度 3.03 mg·L<sup>-1</sup>,  $\Delta\rho(P_{\text{缺}})/\rho(\text{MLSS}_{\text{缺}})$  达到最大值 10.25 mg·g<sup>-1</sup>,利用单位 PHB 的吸磷量也达到最大值 1.32 g·g<sup>-1</sup>·L<sup>-1</sup>,这与王晓莲等的研究中当缺氧区出水硝酸盐浓度控制在 1~3 mg·L<sup>-1</sup> 时反硝化除磷效果好相符合(王晓莲, 2006).

Hu 和陈永志认为缺氧区的硝酸盐负荷影响了反硝化除磷(Hu *et al.*, 2002; 陈永志, 2011).反硝化异养菌的反硝化速率明显高于反硝化除磷菌,只有当硝酸盐负荷高于反硝化菌的条件才会抑制反硝化菌的生长,同时促使反硝化聚磷菌占优势,以此在缺氧区填料上富集大量反硝化除磷微生物.当进一步增加回流比时发现反硝化除磷效果降低,回流比增加到 350% 时,  $\Delta\rho(P_{\text{缺}})/\rho(\text{MLSS}_{\text{缺}})$  的值下降到 7.67 mg·g<sup>-1</sup>,利用单位 PHB 的吸磷量也下降至 0.92 g·g<sup>-1</sup>·L<sup>-1</sup>,虽然回流比增大会促使硝酸盐含量提高,但同时硝化液回流比过大会将好氧池中部分溶解氧带入缺氧池,破坏其缺氧状态,导致吸磷量减少(李相昆, 2006);同时过量的回流导致缺氧池的污泥浓度降低,而低污泥浓度降低了吸磷的速率(张艳萍, 2013)且硝化液回流比过大时,则会提高缺氧池的水力负荷,缩短微生物在缺氧池的水力停留时间,而缩短缺氧时间不利于提高除磷效率(潘芳, 2014).缺氧段的反硝化除磷能力也与其在载体上附着的菌群生物量有关,当生物量达到一定数量后,保持数量不会再增长,生物量有了充足电子受体后,即使再增大回流比也不会增加除磷的效果.

其中硝化液回流比对厌氧释磷效果影响不大,但在硝化液回流比增加到 400% 时,释磷量下降至 16.58 mg·L<sup>-1</sup>,这是因为过大的回流比使硝酸盐在缺氧区的水力停留时间缩短,使得出水硝酸盐浓度提高,然后随污泥回流至厌氧反应区,导致厌氧区的硝酸盐含量增加,破坏了厌氧区的环境.

表 3 不同硝化液回流比下缺氧吸磷量和利用单位 PHB 吸磷量

Table 3 The quantity of phosphorus absorption and PHB utilization under different nitrification liquid reflux ratio

硝化液 回流比	缺氧区出水 硝酸盐浓度 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})/$ (mg·L <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	吸磷量 $\Delta\rho(P_{\text{缺}})/$ (mg·L <sup>-1</sup> )	吸磷量 $\Delta\rho(P_{\text{好}})/$ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\Delta\rho(P_{\text{缺}})/$ $\Delta\rho(\text{MLSS}_{\text{缺}})/$ (mg·g <sup>-1</sup> )	缺氧利用单位 PHB 吸磷量/ (g·g <sup>-1</sup> ·L <sup>-1</sup> )	释磷量 $\Delta\rho(P_{\text{厌}})/$ (mg·L <sup>-1</sup> )	缺氧区磷 去除率
r = 150%	1.73	18.05	7.31	5.01	0.84	24.07	63.3%
r = 200%	2.55	22.67	5.00	5.91	1.12	24.31	74.2%
r = 250%	2.87	25.35	4.72	8.76	1.23	25.16	86.7%
r = 300%	3.03	26.28	2.91	10.25	1.32	24.35	94.8%
r = 350%	5.71	19.02	5.04	7.67	0.92	23.23	82.6%
r = 400%	6.26	12.81	10.15	4.05	0.78	16.58	67.1%

### 3.5 反硝化除磷与好氧除磷的比较

在填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺中,适宜的回流比提供了适量的硝酸盐,通过硝酸盐的负荷压富集强化反硝化除磷效果.在复合系统中,好氧反应区对磷有一定的去除,硝化液回流比对好氧吸磷也有影响.由表 3

可见:随着硝化液回流比的增加,好氧吸磷量从 7.31 mg·L<sup>-1</sup> 下降至 2.91 mg·L<sup>-1</sup>,当回流比增加至 400% 时,吸磷量又增加至 10.15 mg·L<sup>-1</sup>.从图 6 可以看出:随着回流比增加,缺氧吸磷量占总吸磷量的比例逐渐上升,在回流比为 300% 工况下达到最大值,

$\Delta\rho(P_{\text{缺}})/\Delta\rho(P_{\text{总}}) = 0.948$ , 表明缺氧时反硝化除磷占总除磷量的 94.8%, 此时的反硝化除磷对工艺整体除磷的贡献最大, 更重要的是好氧区的曝气量从  $400 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  降低为  $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , 曝气量减少了 25%, 这表明提高系统反硝化除磷的贡献可以节省系统的运行费用。但随着回流比的增加, 好氧吸磷量占总吸磷量在逐渐下降, 从 36.7% 下降至 5.2%, 在回流比为 350% 的工况下又有所回升。通过图 6 还可以看出, 系统中  $\Delta\rho(P_{\text{缺}})/\Delta\rho(P_{\text{好}}) > 1$ , 表明工艺中反硝化聚磷菌处于优势地位, 当回流比为 300% 时, 反硝化聚磷菌优势度显著, 显著高于传统 A<sup>2</sup>/O 除磷的相应比重 36%, 印证了填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺具备反硝化除磷的特性。

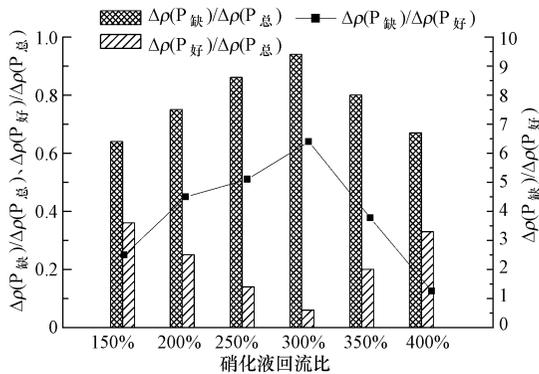


图 6 不同硝化回流比工况下的反硝化除磷与好氧除磷的比例  
Fig.6 The ratio of denitrifying phosphorus removal and aerobic phosphorus removal under different nitrification liquid reflux ratio

通过图 7 可以看出, 随着硝化液回流比的增加, 总氮、氨氮的去除率逐渐升高, 在第 IV 阶段氨氮出水为  $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 氨氮去除率 95%, 在第 IV 阶段总氮出水为  $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 总氮去除率 88.5%, 后两个阶段下降得不多。根据脱氮理论公式 (Volkita *et al.*, 1996):

$$n = (R+r)/(1+R+r)$$

硝化液回流比越大, 脱氮效果越好。但是在实际操作中并不是这样, 主要原因是: ①脱氮公式的理论是以缺氧池为基础的, 所以缺氧池的环境是关键所在; ②后 3 个阶段出现了  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ , 这说明缺氧段所需的  $\text{NO}_3^-$ -N 电子受体已经达到饱和。

综合考虑, 当硝化液回流比大于 300% 时, 磷的去除率下降, 而氮的去除率也接近最大值, 再考虑增大回流比会增加能耗以及影响系统稳定性等因素, 所以选择硝化液回流比为 300%, 此时的反硝化

除磷性能最佳, 不仅促进了反硝化除磷菌的积累和生长, 而且节省了内循环能耗。

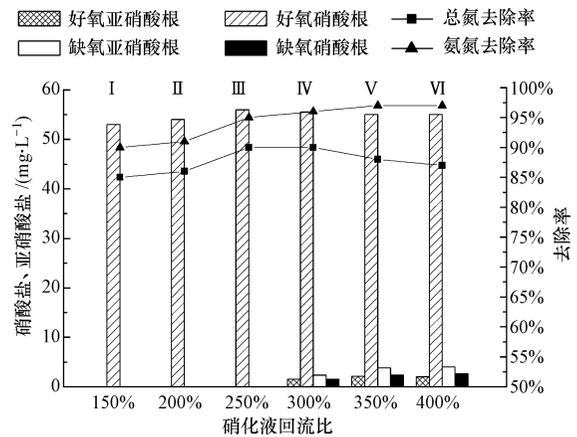


图 7 不同硝化液回流比工况下  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  的变化

Fig.7 The removal of  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  under different nitrification liquid reflux ratio

#### 4 结论 (Conclusions)

1) 填料型 A<sup>2</sup>/O 反应器达到稳定运行的时间长于传统 A<sup>2</sup>/O 反应器, 但 COD 和氨氮去除率均高于传统 A<sup>2</sup>/O 反应器。因为微生物在醛化纤维填料表面形成生物膜需要一定的时间, 当醛化纤维表面的生物膜形成后反应器富集微生物总量要多于无填料型, 可以去除更多的污染物。

2) 填料型 A<sup>2</sup>/O 工艺中的确存在着较好的反硝化除磷现象, 这与醛化纤维填料上吸附的微生物有关, 这部分反硝化聚磷微生物可以利用硝酸盐作为电子受体, 使缺氧段吸磷量逐渐增加, 由于反硝化除磷现象的存在, 好氧区的曝气量减少了 25%, 这表明提高系统反硝化除磷的贡献可以节省系统的运行费用。

3) 通过增加混合液回流比的措施使得反硝化聚磷菌 (DNPAOs) 在纤维填料上富集程度增大, 当硝化液回流比为 300% 时, TP 的去除率为 94.8%, 继续增加混合液回流比, 去除率反而下降, 而此时氮的去除率也接近最大值, 再考虑增大回流比会增加能耗以及影响系统稳定性等因素, 选择最佳硝化液回流比为 300%。

#### 参考文献 (References):

- 陈靖, 何泽超, 张陵. 2007. 反硝化聚磷菌在污水处理中的应用 [J]. 化工设计, 17 (2): 48-51  
陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. 2011. 内循环对 A<sup>2</sup>/O-曝气生物滤池工艺

- 脱氮除磷特性影响[J].环境科学,23(1):193-198
- Ekama G A, Wentzel M C. 1999. Difficulties and developments in biological nutrient removal technology and modelling [J]. *Water Science and Technology*, 39(6):1-11
- Galil N I, Malachi K B, Sheindorf C. 2009. Biological Nutrient Removal in Membrane Biological Reactors [J]. *Environmental Engineering Science*, 26(4):817-824
- Gerakd M S, James L B, Barry R. 1999. Optimizing biological nutrient removal in anoxic zones[J]. *Water Science and Technology*, 39(6):113-118
- Goto M S, Kuribayashi Y, Nonaka M, *et al.* 2002. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus with A<sup>2</sup>/O process using immobilized media. *Water Science and Technology*[J], 46(11-12):113-119
- 郝晓地,张向平,曹亚莉. 2008. 对强化生物除磷机理与工艺认识误区的剖析[J]. *中国给水排水*, 24(6):1-5
- Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. 2002. Anoxic growth of phosphate accumulating organism (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge system[J]. *Water Research*, 36:4927-4937
- Kirilova E P, Cremer H, Heiri O, *et al.* 2010. Eutrophication of moderately deep Dutch lakes during the past century: flaws in the expectations of water management[J]. *Hydrobiology*, 637(1):157-171
- Kuba T, Smolders G, Vanloosdrecht M C M, *et al.* 1993. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. *Water Science and Technology*, 27(5-6):241-252
- 李相昆,张杰. 2006. 反硝化除磷工艺与微生物学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学
- 潘芳,郭刚,王鸿,等. 2014. 缺氧反应时间对反硝化除磷系统脱氮除磷效果的影响[J]. *四川环境*, 33(1):36-40
- Peng Y Z, Wang X L, Li B K, *et al.* 2006. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A<sup>2</sup>/O process[J]. *Desalination*, 189(1/3):155-164
- Seviour R J, Mino T, Onuki M. 2003. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 27(1):99-127
- Volokita M, Belkin S, Abeliovich A, *et al.* 1996. Biological denitrification of drinking water using newspaper [J]. *Water Research*, 30(4):96-103
- 王荣昌,欧阳琛,司书鹏. 2014. 改良型 A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺的反硝化除磷性能研究[J]. *环境工程学报*, 8(2):401-407
- 王晓莲,王淑莹,王亚宜,等. 2006. 强化 A<sup>2</sup>/O 工艺反硝化除磷性能的运行控制策略[J]. *环境科学学报*, 26(5):722-727
- 王亚宜,王淑莹,彭永臻. 2005. MLSS、pH 及 NO<sub>2</sub>-N 对反硝化除磷的影响[J]. *中国给水排水*, 7(7):47-52
- 徐婷,沈耀良. 2010. 水力停留时间及 C/N 比对后置好氧生物膜双泥反硝化除磷的影响[J]. *苏州科技学院学报*, 9(3):1-5
- 姚红,单霞,左玉辉. 2004. 对我国水资源可持续利用的一点思考[J]. *四川环境*, 23(5):76-78
- 张艳萍. 2013. 反硝化除磷污泥的缺氧吸磷性能研究[J]. *环境科学与技术*, 36(5):76-80