

A/O 系统回流污泥磷的释放及好氧段对其的影响

刘 伦^{1,2}, 袁林江^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘 要: 将城市污水处理厂污泥中的磷以化学沉淀的方式回收,既可回收资源又可减少磷的最终排放量。其中 Phostrip 工艺就是污泥磷回收的一种知名工艺,它通过对二沉池富含磷的污泥在回流到前端反应器前将其中的磷进行化学回收。回流污泥磷的释放会对侧流污泥磷的化学回收工艺产生重要的影响,但对此目前尚缺乏足够的研究。为此采用 A/O 反应器,研究了污泥停留时间以及前端曝气时间对侧流污泥磷释放的影响,探究了污泥磷释放的规律。结果表明:在侧流厌氧反应器中污泥仅释放出少量的磷,释磷混合液的日平均浓度仅为 3.66 mg/L,远低于进水磷浓度(8 mg/L);延长污泥厌氧释磷池的停留时间(5.5 h 内)可在一定程度上提高磷的释放量,但 5.5 h 后效果不显著;在污泥摄磷阶段的曝气时间分别为 1、2、4 h 情况下,在厌氧环境中释磷量分别为 6.39、6.74、5.79 mg/gMLSS,表明缩短好氧阶段曝气时间有助于提高侧流磷释放量。

关键词: A/O 生物除磷系统; 化学磷回收; 富磷污泥; 污泥停留时间; 磷释放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)21-0006-05

Release of Phosphorus from the Returned Sludge of A/O Biological Phosphorus Removal System: Effects of Aerobic Aeration Time and SRT

LIU Lun^{1,2}, YUAN Lin-jiang^{1,2}

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology <Ministry of Education>, Xi'an 710055, China)

Abstract: If the phosphorus in the sludge of municipal wastewater treatment plants can be recovered by chemical precipitation, phosphorus discharge will be reduced and its resources recycling can be achieved simultaneously. The Phostrip is a well-known chemical phosphorus recovery process from activated sludge in settling tank before returning to the front of the process. The phosphorus release of the side-stream sludge has an important effect on the operation of the process. The influence of sludge retention time and aeration time in the front tank on phosphorus release was studied in an A/O system. The results showed that a small amount of phosphorus release in side-stream was observed with the daily average concentration of 3.66 mg/L, which was less than that of 8 mg/L in influent. Prolonging anaerobic retention time of the sludge improved the release of phosphorus to some extent within 5.5 h, but could not achieve more after that. The release of phosphorus in the anaerobic environment by the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278406)

通信作者: 袁林江 E-mail: yuanlinjiang@xauat.edu.cn

phosphorus-rich sludges experienced three different aeration time, i. e., 1 h, 2 h and 4 h, were 6.39 mg/gMLSS, 6.74 mg/gMLSS and 5.79 mg/gMLSS, respectively, indicating that the reducing aeration time could effectively improve the phosphorus release.

Key words: A/O biological phosphorus removal system; chemical phosphorus recovery; phosphorus-rich sludge; sludge retention time; phosphorus release

自然环境中的磷是限制藻类和蓝细菌等光能自养型微生物生长的关键营养物质,水中存在过量的磷是引发水体富营养化的主要内因。一般认为当自然水体中的总磷达到 0.015 mg/L 时就可引起富营养化^[1]。因此污水在排入受纳水体前必须对其中的磷进行有效去除。与化学法相比,生物法可兼顾碳、氮的去除,且运行成本低,在城市污水处理厂得到了广泛的应用。

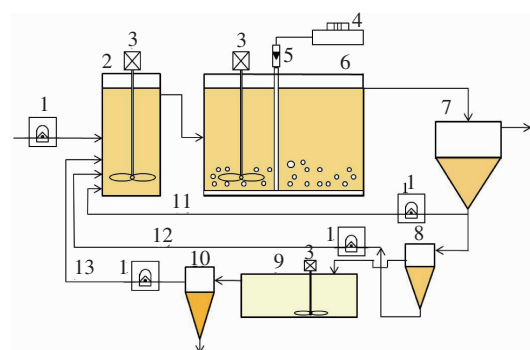
城市污水厂出水已经成为磷污染的重要点源^[2]。同时磷又是一种不可再生、难以替代的自然资源。将城市污水处理厂污泥中的磷以化学沉淀的方式回收可同时实现磷的减排和回收资源的双重目标。结合化学法和生物法的除磷工艺有多种,如厌氧释磷上清液侧流除磷工艺(ASPS)^[3]、以 UCT 工艺为基础的 BCFS^[4]和 Phostrip 工艺^[5]。其中 Phostrip 工艺由 Levin 于 1966 年发明,它通过对二沉池富含磷的污泥在回流到前端反应器前将其中的磷进行化学回收,具有抗负荷波动能力强、耐低温、除磷效果好等优点。

侧流污泥磷释放对该工艺的实施效果具有重要的影响。范凤申等研究发现,当沉淀池污泥停留时间达到 14 h 时上清液的磷含量可超过 20 mg/L,并且投加少量的乙醇会加速磷的释放。然而富磷污泥在缺乏外在有机质的情况下,其释磷规律及内在机理并不明确。为此,在 A/O 连续流反应器中研究侧流污泥停留时间、前端曝气时间对侧流富磷污泥释磷的影响,旨在探明富磷污泥在厌氧环境中的释磷规律,为开发化学磷回收工艺提供指导。

1 试验材料和方法

1.1 反应装置及运行方式

试验工艺流程如图 1 所示,主流部分构筑物有 A/O 连续流反应器,总有效容积为 10 L,其中厌氧反应器为 2.5 L,好氧反应器为 7.5 L,沉淀池为 3.7 L;侧流部分构筑物有厌氧释磷池(2.5 L)、化学反应池(约 10 L)、化学沉淀池(2.5 L)。以上装置均由有机玻璃材料制成。



1.蠕动泵 2.厌氧反应器 3.电动搅拌器 4.曝气泵 5.气体流量计
6.好氧反应器 7.沉淀池 8.厌氧释磷池 9.化学反应池
10.化学沉淀池 11.回流污泥 12.侧流回流污泥 13.侧流水回流

图 1 系统工艺流程

Fig. 1 Flow chart of A/O process with phosphorus recovery

系统运行参数:进水量为 40 L/d,主流反应器的 HRT 为 6 h(厌氧为 1.5 h,好氧为 4.5 h),总污泥回流比为 100%,侧流回流比为 50%。厌氧区和好氧区采用机械搅拌器搅拌。好氧区底部安装条形微孔曝气器以维持 DO 在 4.0 mg/L。污泥龄(SRT)为 15 d。接种污泥来自西安市第四污水处理厂,反应器内污泥浓度为 3 500~4 000 mg/L。室温下运行。

系统运行分为两个阶段,其中阶段一:无侧流 A/O 系统,运行 27 d;阶段二:侧流 A/O 系统,运行 28 d,期间根据厌氧释磷池出水中磷的浓度,按照 Fe 与 P 物质的量之比为 1.4 向化学反应池内投加 FeCl_3 溶液,浓度为 100 mg/L。为了避免残余铁进入主体生物系统,将侧流水直接排放。

1.2 试验水质

试验采用人工配水,分别以乙酸钠、磷酸二氢钾、氯化铵为碳源、磷源和氮源,COD、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 400、8、10 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 180 mg/L, CaCl_2 为 14 mg/L,为满足微生物生长需要每升进水投加 0.25 mL 的微量元素混合液。微量元素组成如下:EDTA·2Na 为 12.85 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 1.54 g/L, H_3BO_3 为 0.15 g/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为 0.03 g/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 为 0.12 g/L, KI 为 0.18 g/L,

$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 0.06 g/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 0.12 g/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 0.15 g/L。

1.3 测定方法

常规指标采用标准方法测定, MLSS 和 MLVSS 采用重量法测定, pH 值利用 pH 计测定, DO 利用 HQ40d 分析仪测定, COD 采用消解法测定, 可溶性磷酸盐以及总磷采用钼锑抗分光光度法测定, 糖原采用蒽酮比色法测定, PHAs 采用气相色谱法测定^[6]。试验结果取 3 组平行样测定结果的平均值。

2 结果与讨论

2.1 侧流前后系统除磷性能对比

在无侧流情况下, 系统出水磷的平均浓度为 (0.18 ± 0.12) mg/L, 平均去除率为 97.7%; 引入侧流之后, 系统出水磷的平均浓度为 (0.32 ± 0.07) mg/L, 平均去除率为 95.9%。可见, 引入侧流后系统整体除磷效率稍有下降但仍保持较高的去除效果, 并且出水磷浓度始终低于 0.5 mg/L。

随着系统的运行, 污泥的含磷量不断提高, 1、13、27、41、55 d 时的含磷率分别为 2.1%、3.0%、4.0%、4.4%、5.0%。可见, 无侧流和引入侧流后的两个阶段, 系统的聚磷能力均在增强。

引入侧流后, 50% 的污泥直接回流至主体厌氧段, 另外 50% 则被引入厌氧释磷池, 也就是侧流回流污泥经历了更长久的厌氧环境, 出现了释磷现象 (见图 2)。侧流污泥回流至主体厌氧段时, 接触外碳源时再次释磷。有研究表明, 在 A/O 强化生物除磷系统中, 微生物在厌氧阶段的释磷量越大, 在好氧阶段的摄磷量就越大。这是由于聚磷菌胞内含有聚磷颗粒, 在厌氧阶段聚磷水解会释放能量供聚磷菌代谢, 聚磷含量越高, 可供能量就越高, 越有利于代谢, 相反聚磷含量减少则不利。

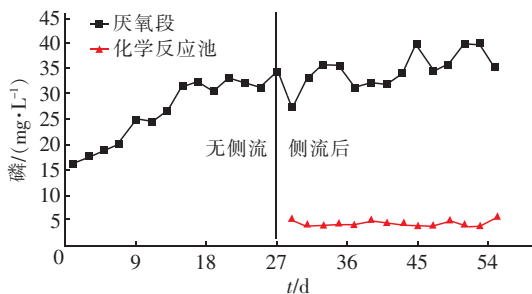


图2 引入侧流前后系统不同位点的磷酸盐浓度变化

Fig.2 Phosphorus concentration variation on different points of the system

侧流对 A/O 系统回流污泥中溶解性磷酸盐的浓度无明显影响, 平均为 0.17 mg/L, 与反应器出水相当。表明在常规的污泥回流线路中不会出现磷的释放现象。引入侧流后, 经过厌氧释磷池时富磷污泥会向液相释放一定量的磷, 化学反应池内磷的平均浓度为 3.66 mg/L, 相比进水的 8 mg/L 则明显较低。回流污泥侧流部分出现的释磷现象与厌氧释磷池有直接关系。

2.2 厌氧释磷池的停留时间对污泥释磷的影响

系统内的回流污泥在长达 9.5 h 的厌氧环境中, 开始会不断向液相中释放磷, 并在 5.5 h 时液相中磷的浓度达到最大 (6.47 mg/L), 在随后的 4 h 内则保持这一水平 (如图 3 所示)。在该过程中污泥至少经历了两个不同的阶段, 其中阶段一有磷的释放, 而阶段二则无释磷现象发生。这是由于污泥代谢方式发生了变化。由于外碳源不足, COD 平均浓度仅为 40.22 mg/L, 污泥进行内源呼吸, 但内源呼吸所需要的能量来源却不同^[7], 阶段一的代谢产物物质中包含了聚磷, 而阶段二则由其他胞内物质提供, 聚磷不再分解提供能量。由此表明, 适当地延长侧流污泥在厌氧释磷池中的停留时间, 可以提高液相中磷的浓度。

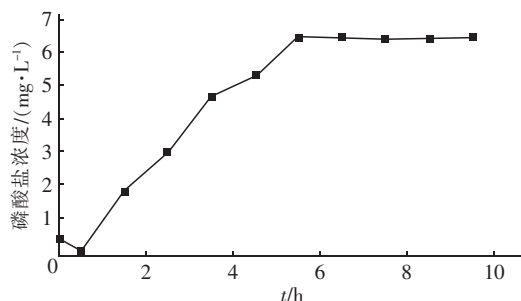


图3 富磷污泥在厌氧阶段释放的磷酸盐浓度随时间的变化

Fig.3 Variation of dissolved phosphorus concentration during the anaerobic period

2.3 好氧段曝气时间对侧流污泥释磷的影响

在强化生物除磷系统中, 污泥在厌氧段进行磷的释放, 在好氧段则过量吸磷, 通过厌氧、好氧的交替实现了高效除磷。在本研究中, 当主流系统的好氧池曝气时间分别为 4、2、1 h 时, 富磷污泥在后续厌氧环境下会发生磷的释放, 释磷量分别为 5.79、6.74 和 6.39 mg/gMLSS。在 3 种情况下, 液相 COD 浓度波动不明显, 平均浓度分别为 47.72、35.00 和 31.58 mg/L。1 h 和 2 h 情况下, COD 浓度差别不

大,4 h 的好氧则使微生物进入了内源呼吸,并向液相释放难被微生物利用的有机质,因此导致 COD 浓度较高。

污泥在前置 1 h 好氧的情况下,产生糖原的量明显要高,并在厌氧释磷阶段随时间减少(见图 4),在厌氧代谢过程中被微生物利用,而此时并没有 PHAs 类物质被合成,表明聚磷和糖原为代谢提供能量,聚磷水解后释放到液相。在前置 4 h 好氧的情况下,糖原水平较 1 h 的低,并且在厌氧阶段未产生明显变化,与此同时,PHAs 类物质在整个厌氧阶段也并未被检测到,表明聚磷在该条件下充当唯一供能物质。在前置好氧 2 h 的情况下,污泥中糖原水平较 4 h 的低,但 PHAs 类物质则明显存在并且随着时间减少,表明在该条件下,PHAs 类物质并未在好氧阶段完全转化为糖原,而是在随后的厌氧阶段充当碳源被微生物利用,聚磷和 PHAs 为代谢提供能量。因此前置好氧时间会影响富磷污泥胞内物质含量水平,进而影响其释磷。

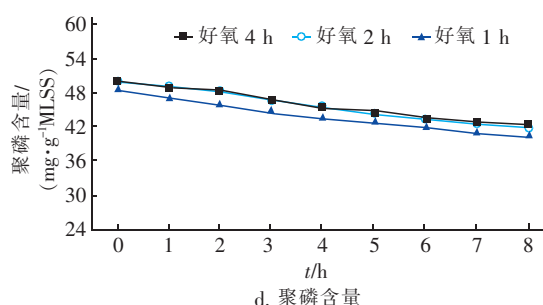
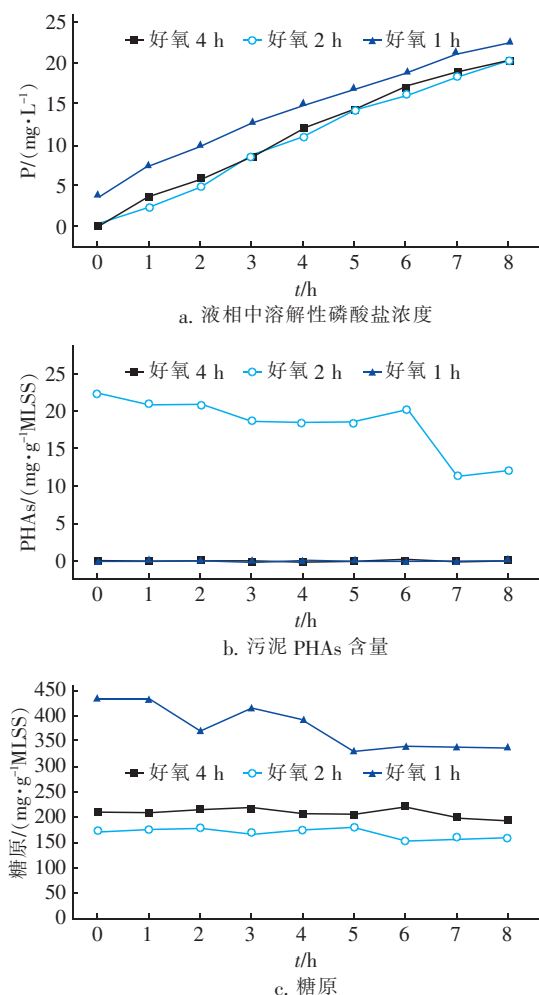


图 4 主流系统的曝气时间对富磷污泥厌氧释磷的影响

Fig. 4 Effect of aeration time on phosphorus release of the phosphorus-rich sludge during the anaerobic period

3 结论

污泥在侧流线路中会产生少量磷的释放,适当延长污泥厌氧释磷池的停留时间可提高磷的释放量;在生物段曝气时间分别为 1、2、4 h 三种情况下,在厌氧环境中污泥代谢利用不同的物质提供能量。曝气时间为 2 h,既可以确保好氧结束时液相中的磷浓度较低,又可提高后续厌氧释磷阶段磷的释放量。

参考文献:

- [1] 郎龙麒,万俊锋,王杰,等. 生物除磷技术在水处理中的应用和研究进展[J]. 水处理技术,2013,39(12): 11-15.
Lang Longqi, Wan Junfeng, Wang Jie, et al. Application and latest research progress of biological phosphorus removal technology for wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(12): 11-15 (in Chinese).
- [2] Blackall L L, Crocetti G R, Saunders A M, et al. A review and update of the microbiology of enhanced biological phosphorus removal in wastewater treatment plants [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2002, 81(1/4): 681-691.
- [3] 席粉鹊,袁林江,吕景花. 侧流化学除磷对 AO 连续流生物除磷系统的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5231-5236.
Xi Fenque, Yuan Linjiang, Lü Jinghua. Effects of anaerobic supernatant stripping process on AO phosphorus removal system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(12): 5231-5236 (in Chinese).
- [4] 许明,操家顺,常飞,等. BCFS 工艺处理低 C/N 比城市污水的中试研究[J]. 水处理技术, 2007, 33(10): 46-48.
Xu Ming, Cao Jiashun, Chang Fei, et al. A pilot test for treatment of municipal sewage by BCFS [J]. Technology

of Water Treatment, 2007, 33(10): 46–48 (in Chinese).

- [5] 周希安, 张有贤, 张会敏, 等. 改进的 Phostrip 工艺在肖家河污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2006, 22(8): 66–69.
- Zhou Xi'an, Zhang Youxian, Zhang Huimin, *et al.* Application of modified Phostrip process in Xiaojiahe Wastewater Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(8): 66–69 (in Chinese).
- [6] Tong J, Chen Y. Enhanced biological phosphorus removal driven by short-chain fatty acids produced from waste activated sludge alkaline fermentation[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 41(20): 7126–7130.
- [7] 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 Wenquan, 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]. Environmental Science, 2002, 23(3): 49–52

(in Chinese).



作者简介: 刘伦(1988–), 男, 陕西榆林人, 博士研究生, 研究方向为城市污水处理及资源化理论与技术。

E-mail: ll19881017@yeah.net

收稿日期: 2019–03–09

(上接第 5 页)

40–43 (in Chinese).

- [6] 李祥, 黄勇, 朱莉, 等. 厌氧氨氧化前置亚硝化反应器启动及稳定研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(7): 96–99.
- Li Xiang, Huang Yong, Zhu Li, *et al.* Study on start-up and stability of pre-nitrification reactor for ANAMMOX [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(7): 96–99 (in Chinese).
- [7] 陈重军, 王建芳, 张海芹, 等. 厌氧氨氧化污水处理工艺及其实际应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 521–527.
- Chen Chongjun, Wang Jianfang, Zhang Haiqin, *et al.* Research progress in anammox wastewater treatment system and its actual application [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3): 521–527 (in Chinese).
- [8] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas

production and reduced aeration energy for N-removal [J]. Water Sci Technol, 2008, 57(3): 383–388.



作者简介: 黄拓(1992–), 男, 广东惠州人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理。

E-mail: 536700757@qq.com

收稿日期: 2019–03–12