

低温污水处理 A²/O 工艺好氧活性污泥厌氧释磷影响因素

李建政¹, 郭亚琼¹, 赫俊国¹, 金羽^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院; 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090
2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030

摘要 为强化 A²/O 低温污水处理系统的除磷效能, 在好氧工艺段后增设了厌氧释磷池, 并对其运行控制参数进行了探讨。研究表明, 二沉池好氧污泥的厌氧释磷有效提高了低温 A²/O 系统的总磷去除率, 同时对 COD 的去除效能也得到了提高。为满足厌氧释磷对碳源的需求, 可引入原水与二沉池新鲜污泥以体积比 1:1 混合, 适宜的污泥负荷为 0.015—0.02g COD/g MLSS。对于间歇运行工艺, 适宜的释磷反应时间为 14h, 而在连续流工艺中, 应控制污泥停留时间为 12h。NO₃⁻对好氧污泥的厌氧释磷有显著抑制作用, 以不大于 5mg/L 为宜。为提高污泥厌氧释磷的效率, 可采用间歇式缓慢搅拌。

关键词 低温污水处理; A²/O 工艺; 污泥; 厌氧释磷; 影响因素

中图分类号 TU992.3

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.20.007

Influencing Factors of the Anaerobic Phosphorus Release From Aerobic Activated Sludge in Low-Temperature A²/O Process

LI Jianzheng¹, GUO Yaqiong¹, HE Junguo¹, JIN Yu^{1,2}

1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment; School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China
2. School of Resources & Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

Abstract To enhance the phosphorus removal in the low-temperature A²/O wastewater treatment process, an anaerobic phosphorus release tank is attached to the aerobic treating process, and the control parameters of the tank are analyzed. The results show that the anaerobic phosphorus release of aerobic activated sludge from the secondary clarifier effectively improves the TP removal efficiency of the low-temperature A²/O process, and the COD removal is at the same time enhanced. In order to meet the demand for the carbon source of the anaerobic phosphorus release, raw water should be put into the anaerobic phosphorus release tank and mixed with the fresh sludge from the secondary clarifier in a volume ratio of 1:1, with a sludge load of 0.015—0.02g COD/g MLSS. For an sequencing batch process, the optimum sludge retention time is 14h, while in a continuous flow process it is 12h. NO₃⁻ would significantly inhibit the anaerobic phosphorus release, so its concentration should be controlled within 5mg/L. The intermittent slow blend is suggested to improve the efficiency of anaerobic phosphorus release.

Keywords low-temperature wastewater treatment; A²/O process; sludge; anaerobic phosphorus release; influencing factors

0 引言

随着工业和城镇的迅速发展, 以及各种化学制剂的广泛使用, 随污水排放的氮磷总量不断攀升, 导致水体富营养化日趋严重, 成为当今世界面临的重大水环境问题^[1-2]。植物营养元素氮和磷, 被认为是水体富营养化的限制性营养因子, 污水的

脱氮除磷对防治水体富营养化具有重要意义^[3-4]。目前, 大多数污水处理厂均采用同步生物脱氮除磷工艺, 其中 A²/O 工艺最具有代表性^[5-6]。然而, 在高寒地区的寒冷季节, 微生物活性显著降低, A²/O 工艺的效能受到显著影响, 氮和磷的达标排放困难^[7]。

收稿日期: 2011-06-14; 修回日期: 2011-06-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07207-005-02); 黑龙江省青年科学基金项目 (QC2009C29)

作者简介: 李建政, 教授, 研究方向为有机废水处理与资源化技术, 电子信箱: ljz6677@163.com

经二沉池排放剩余污泥是 A²O 系统除磷的重要途径。在前期研究低温 A²O 系统效能的调控策略中,提出了在二沉池之后增设污泥厌氧释磷工艺单元的思路,希望通过厌氧条件的刺激,强化污泥的厌氧释磷,同时提高微生物的好氧代谢活性,达到全面提高 A²O 系统处理效能的目的^[5-6]。而富含可溶性磷酸盐的厌氧释磷上清液,则可作为液体肥料或其他固体肥料的添加剂加以回收利用^[10]。为探讨这一技术的可行性,本文以 A²O 低温污水处理系统的运行为基础,研究污泥负荷率(SLR)、硝酸盐、污泥停留时间(SRT)和搅拌对二沉池污泥厌氧释磷的影响,以期对低温 A²O 工艺的改良和污泥厌氧释磷单元的运行提供指导。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置和试验污水

为探讨低温条件下提高 A²O 系统效能的调控策略,在前期研究中,模拟北方某城市污水处理厂工艺,制作并运行了总有效容积为 70L 的 A²O 处理装置,其基本工艺流程为:进水→厌氧池→缺氧池→中沉池→好氧池→二沉池→出水。其中,厌氧池、缺氧池、好氧池的容积比为 1:1:3,从中沉池到厌氧池之间设有污泥回流,从好氧池到缺氧池设有硝化液回流,而二沉池污泥一部分回流到好氧池,其余的作为剩余污泥排出系统,这也是 A²O 系统除磷的最主要途径。该装置外置水套并通过冷水机实现水体循环和温度控制。A²O 系统在(14±1)℃、进水量 4L/h、中沉池污泥回流比 50%、二沉池污泥回流比 50%、硝化液回流比 200%、曝气池 SRT 为 15d 等条件下达到运行稳定,出水 COD 平均为 25mg/L,但总磷(TP)不能达标,为 2.03mg/L。为提高该系统的除磷效果,在二沉池之后增设了一个有效容积为 7.6L 的污泥厌氧释磷池。通过台面实验完成污泥厌氧释磷条件的探讨后,借助该池的连续运行,最终确定了适宜的污泥厌氧释磷反应时间。

试验用水取自哈尔滨市某生活小区,COD 为 147—330mg/L,NH₄⁺-N 为 33—61mg/L,NO₃⁻ 为 0.3—1.5mg/L,总氮(TN)为 35—77mg/L,TP 为 3.0—7.1mg/L。

1.2 试验方法

1.2.1 污泥负荷率

取第 1.1 节所述 A²O 系统二沉池污泥 2.5L,污泥浓度(MLSS) 6584 mg/L 均分为 5 份,分别置于 1L 烧杯中;向 5 只烧杯中分别加入 0(对照)、0.125、0.25、0.375、0.5L 原水(COD 为 246mg/L),补加蒸馏水至 1L,构建污泥负荷率 SLR 分别为 0.005、0.008、0.015、0.020 和 0.029g COD/g MLSS 的反应系统。将各反应系统置于(14±1)℃下释磷反应,每 2h 取样一次(上清液),并缓慢搅拌 1min。经测定,所构建污泥释磷体系中的初始 NO₃⁻ 浓度最高为 0.67mg/L,不会对厌氧释磷造成显著影响^[11]。

1.2.2 硝酸盐

试验设置了无外加碳源和外加碳源两组反应系统。无外加碳源反应系统的构建方法为:取第 1.1 节所述 A²O 系统二沉池污泥(MLSS 5968 mg/L)2.5L,均分为 5 份,分别置于 1L 烧

杯中;向 5 只烧杯中分别加入 0(对照)、5、10、15、20mL 硝酸盐溶液(1g/L 的 KNO₃),补加蒸馏水至 1L,得到无外加碳源、SLR 为 0.010g COD/g MLSS,硝酸盐浓度分别为 0.27、5、10、15 和 20mg/L 的反应系统。以同样的方法,用污水(COD 为 271mg/L)代替蒸馏水,构建得到具有同样 NO₃⁻ 浓度梯度的外加碳源反应系统,其 SLR 均为 0.030g COD/g MLSS。各反应系统置于(14±1)℃下释磷培养,每 2h 取样一次(上清液),并缓慢搅拌 1min。

1.2.3 搅拌

采集 A²O 系统二沉池污泥,加入原水(与污泥等体积),并以补加蒸馏水的方式构建 SLR 为 0.015g COD/g MLSS 的污泥混合系统 2 组(其 NO₃⁻-N 为 0.50mg/L),其中一组静止,另一组则每 2h 缓慢搅拌 1min。每 2h 取样 1 次。

1.2.4 连续流厌氧释磷的污泥停留时间

以台面厌氧释磷试验结果为指导,启动 A²O 系统中的厌氧释磷池(14℃±1℃),通过控制其运行确定厌氧释磷的适宜 SRT。具体操作如下:二沉池污泥和原水均以 2L/h 的流量进入厌氧释磷池,每 2h 缓慢搅拌 1min;不同的 SRT 通过控制污泥排放流量的方式实现,上清液连续流溢出。每当调整并稳定控制特定 SRT 后,厌氧释磷池至少运行 3 个 SRT 周期,所测水质指标取其平均值。

1.3 分析项目与方法

COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP、MLSS 和 pH 值等均采用标准方法测定^[12],其中 pH 值采用梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司 WTW-340i 型酸度计测定。

2 结果与讨论

2.1 污泥负荷率对厌氧释磷的影响

有机碳源是污泥厌氧释磷的必要条件,工程中一般采用引入原水的方法实现^[13]。SLR 对低温 A²O 系统二沉池污泥厌氧释磷的影响试验表明(图 1),不同 SLR 的厌氧释磷系统所表现出的释磷规律是类似的,释磷量在前 14h 内与反应时间几乎呈正比,之后则趋于停止。由图 1(a)所示结果可知,SLR 的不同,显著影响了污泥的释磷效果。当 SLR 由 0.005 增加到 0.015g COD/g MLSS 时,反应 14h 后,上清液中的 TP 浓度分别从起始的 1.50 和 6.63mg/L 升高至 15.16 和 27.52mg/L,污泥的释磷量从 13.7mg 大幅提高至 20.89mg。当 SLR 继续提高到 0.020 和 0.029g COD/g MLSS 时,污泥的释磷量仍在增加,但幅度不大。

各反应系统中的 COD 变化则表现出与 TP 变化相反的趋势(图 1(b))。在前 14h,COD 浓度迅速降低,之后则趋于平缓。分析认为,在厌氧条件下,污水中的可降解有机物在微生物的发酵作用下首先转化为挥发性脂肪酸(VFAs)等小分子有机物,而活性污泥中的聚磷菌则优先利用 VFAs 等小分子有机物合成聚-β-羟丁酸(PHB),同时大量释磷,表现为废水中的 COD 浓度显著降低和释磷量增加^[14]。在易降解有机物利用殆尽后,由于聚磷菌对其他大分子有机物的转化利用能力较差,系统中的 COD 去除量随之下降^[15]。由图 1(b)所示的结果可知,SLR 的提高对于系统 COD 的去除率影响很大。当 SLR 由

0.005g COD/g MLSS 逐步升高到 0.08、0.015 和 0.02g COD/g MLSS 时,系统中的 COD 浓度分别从初始的 18、26、48 和 66mg/L 降低为 14h 的 10、14、29 和 32mg/L, COD 去除率分别为 43%、47%、40% 和 51%。当 SLR 继续提高到 0.029g COD/g MLSS 时,其在前 14h 的 COD 去除率下降到 49%,且残留 COD 高达 50mg/L。综合考虑 COD 去除和厌氧释磷的效果, A²/O 二沉池污泥厌氧释磷的 SLR 选择 0.015—0.02g COD/g MLSS 为宜。

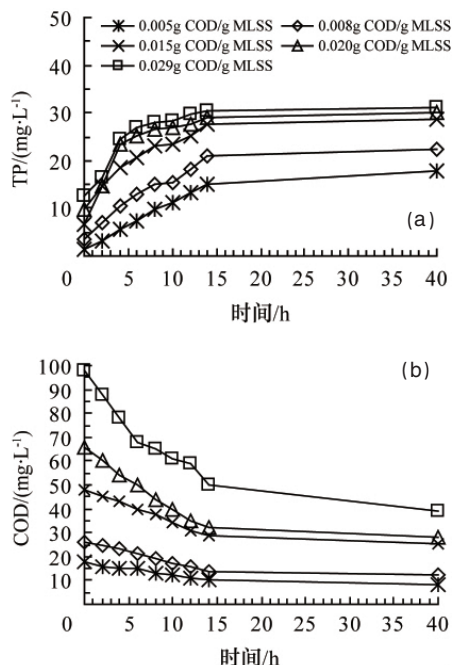


图 1 有机负荷对污泥厌氧释磷(a)及 COD 去除(b)的影响

Fig. 1 Influence of organic loading rate on the phosphorus release (a) and COD removal (b) in the anaerobic activated sludge system

2.2 硝酸盐浓度对厌氧释磷的影响

研究表明, NO₃⁻浓度达到一定水平就会对污泥的厌氧释磷产生显著抑制,其机制主要有以下 3 个方面: (1) NO₃⁻可提高反应体系的氧化还原电位,促进微生物体内的以 NO₃⁻为电子受体的聚羟基脂肪酸氧化反应,抑制了厌氧释磷反应的进行^[14]; (2) 在碳源充足时,厌氧系统中的反硝化细菌将优先利用碳源把 NO₃⁻还原为 N₂,从而对厌氧释磷产生竞争性抑制^[13]; (3) 系统中存在的反硝化聚磷菌,可以 NO₃⁻作为电子受体进行磷酸盐聚合反应,促进磷的吸收^[15-19]。在 A²/O 系统中的好氧处理工艺段,硝化作用将提高污水中的 NO₃⁻浓度,会与沉淀污泥一起进入厌氧释磷池。为保证二沉池污泥厌氧释磷的效果,探明并控制反应系统中的 NO₃⁻浓度是必要的。

试验结果表明,无论是无外加碳源系统(图 2(a))还是有外加碳源系统(图 2(b)),其厌氧释磷反应均主要发生在前 14h,而且,随着系统中 NO₃⁻浓度提高,释磷反应受到了越来越严重抑制。在无外加碳源系统中(图 2(a)),随着 NO₃⁻浓度的升高,厌氧释磷效果逐渐变差,在较高 NO₃⁻浓度时,甚至还出现了反应“停滞期”,而且,这一“停滞期”随着 NO₃⁻浓度的提高而延

长。厌氧释磷 14h 时, NO₃⁻浓度分别为 0.27、5、10 和 15mg/L 的反应系统,其上清液中的 TP 分别为 13.51、10.55、7.85、5.59mg/L,释磷量分别为 11.31、8.95、4.79 和 3.99mg, NO₃⁻浓度为 20mg/L 的反应系统在 14h 内甚至没有发生明显的释磷反应。当引入碳源(污水)后(图 2(b)),污泥厌氧释磷效果显著提升,在高 NO₃⁻浓度下表现出的反应“停滞期”也得到了很大程度缓解,但 NO₃⁻浓度对厌氧释磷的影响仍然是显著的。由图 2(b)所示结果可知,当 NO₃⁻浓度从 0.27mg/L 分别递增至 5、10、15 和 20mg/L 时,反应系统上清液中的 TP 浓度从 32.74mg/L 逐步降低为 30.21、29.08、24.73 和 22.73mg/L,释磷量分别为 23.93、21.18、20.62、16.62 和 14.65mg。因此,对于二沉池剩余污泥的厌氧释磷,有外加碳源比较理想,而 NO₃⁻浓度越低越好,建议不大于 5mg/L。

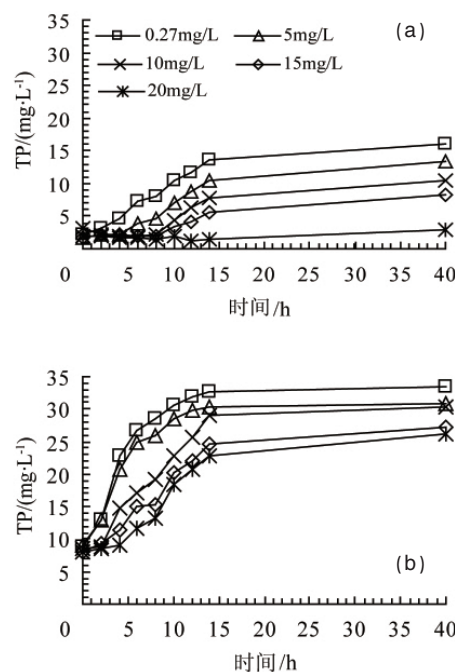


图 2 硝酸盐对无外加碳源(a)和以原水为补加碳源(b)污泥厌氧释磷的影响

Fig. 2 Influence of nitrate on the phosphorus release of activated sludge without (a) and with (b) waste water as the carbon source

2.3 搅拌对厌氧释磷的影响

适当的搅拌可促进传质,消除局部磷浓度过高对厌氧释磷产生的抑制作用,因而有利于污泥的厌氧释磷^[7]。试验结果表明(图 3),对于 SLR 为 0.015g COD/g MLSS 的污泥厌氧释磷系统,无论搅拌与否,其释磷反应主要发生在前 14h,而搅拌(每 2h 缓慢搅拌 1min)则可显著提高释磷效率。反应进行 14h,无搅拌系统上清液的 TP 浓度从初始的 6.20mg/L 增加到 16.81mg/L,释磷量仅为 10.62mg。而有适当搅拌的污泥系统,经 14h 的反应,其上清液的 TP 浓度从初始的 6.63mg/L 升高到 27.52mg/L,释磷量高达 20.88mg,几乎是无搅拌系统的 2 倍。可见,间歇缓慢搅拌,可大幅度提高污泥厌氧释磷的效能。

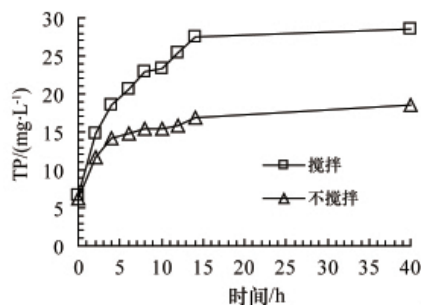


图3 搅拌与否对污泥厌氧释磷的影响

Fig.3 Influence of lax blend on the phosphorus release of activated sludge

2.4 污泥停留时间对厌氧释磷的影响

有关SLR、NO₃⁻及搅拌的间歇培养试验结果,都说明污泥厌氧释磷反应主要发生在前14h。但实际工程中的污泥厌氧释磷单元,更有可能是连续流工艺。为了获得连续流运行条件下厌氧释磷的适宜SRT,在正常运行A²O低温污水处理系统的基础上,启动并运行了增设的厌氧释磷池,考查了SRT变化对厌氧释磷效果的影响。如图4所示的试验结果表明,在二沉池污泥和原水流量均为2L/h,每2h缓慢搅拌1min的条件下,厌氧释磷池出水的TP随SRT的延长而增加,前12h两者几乎呈正比,而12h后,TP浓度增势趋于停滞。在SRT为12h时,流入泥水混合液之沉清液的TP平均为7.48mg/L,溢流的TP高达50.56mg/L左右,厌氧释磷效果理想。经测定,在厌氧释磷池SRT为12h、污泥回流比75%的条件下,好氧工艺段出水的COD和TP,由厌氧释磷池启动前的25.41和2.03mg/L降为20.54和0.3mg/L。可见,二沉池好氧污泥的厌氧释磷,有效提高了A²O低温污水处理系统的TP去除率,同时对COD的去除效能也得到了提高。

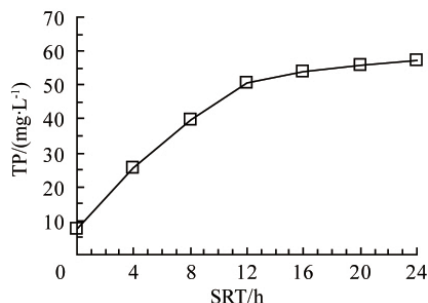


图4 SRT对厌氧释磷的影响

Fig.4 Influence of SRT on the phosphorus release of activated sludge

3 结论

为了保证低温A²O系统的除磷效果,进行了二沉池污泥厌氧释磷影响因素研究,得到如下结论。

(1) 引入原水与二沉池新鲜污泥以一定比例混合,可满足污泥厌氧释磷反应对碳源的需求,二者的体积或流量比可以1:1为参考,适宜的污泥负荷率为0.015—0.02 g COD/g MLSS。NO₃⁻浓对好氧污泥的厌氧释磷有显著抑制作用,以不大于

5mg/L为宜。

(2) 对于间歇运行工艺,适宜的释磷反应时间为14h,而在连续流工艺中,适宜的污泥停留时间为12h。为提高污泥厌氧释磷的效率,建议采用间歇式缓慢搅拌,搅拌时间以1min左右为宜。

参考文献 (References)

- [1] Le C, Zha Y, Li Y, *et al.* Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control[J]. *Environmental Management*, 2010, 45(4): 662–668.
- [2] Akpor O B, Muchie M. Environmental and public health implications of wastewater quality [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(13): 2379–2387.
- [3] Gebremariam S Y, Beutel M W, Christian D, *et al.* Research advances and challenges in the microbiology of enhanced biological phosphorus removal—A critical review [J]. *Water Environment Research*, 2011, 83(3): 195–219.
- [4] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: From micro to macro scale [J]. *Water Research*, 2007, 41(11): 2271–2300.
- [5] Seviour R J, Mino T, Onuki M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, 27(1): 99–127.
- [6] Blackall L L, Crocetti G, 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 International Journal of General and Molecular Microbiology*, 2002, 81(1–4): 681–691.
- [7] Ventura J S, Seo S, Chung I, *et al.* Enhanced reduction of excess sludge and nutrient removal in a pilot-scale A(2)O-MBR-TAD system[J]. *Water science and Technology*, 2011, 63(8): 1547–1556.
- [8] Banu J R, Uan D K, Yeom Ick-Tae. Nutrient removal in an A²O-MBR reactor with sludge reduction [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(16): 3820–3824.
- [9] Di T D, Christensso M, Odegaard H. Hybrid activated sludge/biofilm process for the treatment of municipal wastewater in a cold climate region: A case study[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(6): 1121–1129.
- [10] Himanen M, Hanninen K. Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges—effect of feedstock on the process and quality of compost[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2842–2852.
- [11] Ma J A, Peng C Y, Takigawa A, *et al.* Effect of influent nutrient ratios and temperature on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a step-feed CAST[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 62(9): 2028–2036.
- [12] Greenberg A E. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. 19th ed. Washington DC: American Public Health Association, 1995.
- [13] Wu H Y, Gao J Y, Yang D H, *et al.* Improved nitrogen removal effect in continuous flow A²O process using typical extra carbon source [C]. 2nd International Symposium on Aqua Science, Water Resource and Low Carbon Energy, Sanya, December 7–10, 2009.
- [14] Li H J, Chen Y G, Gu G W. The effect of propionic to acetic acid ratio on anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) biological phosphorus and nitrogen removal[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(10): 4400–4407.
- [15] Zhou S Q, Zhang X J, Feng L Y. Effect of different types of electron acceptors on the anoxic phosphorus uptake activity of denitrifying phosphorus removing bacteria[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1603–1610.
- [16] Bi D S, Guo X P. Mechanism of phosphorus release of phosphorus-rich waste activated sludge under anaerobic, anoxic and aerobic conditions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(5): 540–543.
- [17] 薛涛, 黄霞. 高磷负荷对生物除磷系统的影响 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(12): 2146–2148.

Xue Tao, Huang Xia. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition*, 2007, 47(12): 2146–2148.

(责任编辑 岳臣)