



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201901090

中图分类号 X703

文献标识码 A

张彦平, 李凌冲, 路广平, 等. 高铁酸盐氧化-A/O 工艺污泥减量及强化脱氮[J]. 环境工程学报, 2019, 13(12): 2870-2877.

ZHANG Yanping, LI Lingchong, LU Guangping, et al. Sludge reduction and enhanced nitrogen removal in ferrate oxidation-A/O process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(12): 2870-2877.

高铁酸盐氧化-A/O 工艺污泥减量及强化脱氮

张彦平^{1,2,*}, 李凌冲^{1,2}, 路广平¹, 张千¹

1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401

2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401

第一作者: 张彦平(1978—), 女, 博士, 副教授。研究方向: 污水、污泥处理及资源化利用, E-mail: zyphit@163.com

*通信作者

摘要 为了减少传统生物处理工艺剩余污泥排放量及强化脱氮效果, 设计了高铁酸盐氧化-A/O 工艺。以模拟生活污水为处理对象, 研究对比了破解后不同回流比对高铁酸盐氧化-A/O 工艺的污泥减量和强化脱氮效果的影响, 并对出水水质和污泥性能进行了综合评价。实验结果表明: 剩余污泥破解回流比 r 为 50% 时, 污泥产率系数 Y_{OBS} 为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 剩余污泥量减少最多, 为 46%; 高铁酸盐氧化-A/O 工艺对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别达到 71.7% 和 88.8%, CFS 污泥破解液具有较好的可生化性, 可被反硝化菌有效利用, 脱氮效果明显提高; 该运行工况下, 污泥浓度、污泥活性均有所提高, 污泥沉降性得到改善。此外, 污泥破解液引入系统的 Fe^{3+} 可在一定程度上提高了 TP 的去除率。高铁酸盐氧化-A/O 工艺能够提高污染物去除率, 实现污泥减量同步强化脱氮的目的。

关键词 反硝化碳源; 污泥减量; 脱氮; 高铁酸盐氧化-A/O 工艺

随着环保形势的日益严峻, 污染物排放标准愈加严格, 尤其是导致水体富营养化的氮元素, 如北京市最新标准《北京地方水污染排放标准》(DB 11/307-2013) 规定, 污水厂出水 TN 不得高于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。污水生物处理过程中氮元素的去除是在硝化和反硝化反应共同作用下实现的, 但由于我国城镇污水厂进水碳源普遍不足导致反硝化效率低下, 使得碳源不足成为制约出水 TN 达标的重要因素^[1]。为解决这一问题, 在水厂运行过程中, 一般通过投加甲醇等补充碳源的方式提高脱氮效率^[2]。然而投加补充碳源不仅增加了运行成本, 也会增加剩余污泥的产量^[3]。与此同时, 在生物处理过程中, 微生物将有机物同化为自身细胞物质, 以剩余污泥的形式被排出系统。这不仅增加后续污泥处理的成本, 还造成了其所含丰富碳源的浪费^[4]。在此背景下, 研究者们提出多种剩余污泥破解方法并将其作为碳源回用。QIANG 等^[5]采用臭氧污泥破解液回流至 A^2/O 系统, 除磷效果得到明显改善。LIU 等^[6]研究了污泥水力破解后作为碳源对反硝化速率的影响, 发现反硝化速率增加, TN 去除率增加。LIU 等^[7]将碱解发酵污泥破解液作为 A^2/O 系统的反硝化补充碳源, 脱氮除磷率均得到明显的提高, 并且与传统工艺相比有巨大的经济优势; KONDO 等^[8]进一步研究了剩余污泥破解回流比对强化反硝化脱氮的影响, 发现当污泥破解量为总污泥量 9.40% 时, 剩余污泥排放量减少 50%, 反硝化效果提高。

收稿日期: 2019-01-12; 录用日期: 2019-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51608166)

高铁酸盐作为一种氧化性强、绿色、多功能的新型氧化剂，在污泥处理领域已得到了广泛应用和研究，相关研究^[9-11]证实了高铁酸盐具有良好的污泥溶胞性能，能有效地破坏污泥细胞，溶出胞内物质。在氧化破解污泥的过程中， Fe^{6+} 可被还原为 Fe^{3+} ， Fe^{3+} 可以改善污泥的沉降性能和脱水性能^[12-14]。为实现高铁酸盐的工艺利用，本研究采用复合高铁酸盐溶液 (composite ferrate solution, CFS) 破解污泥，将破解液回流至 A/O 系统强化反硝化脱氮，即高铁酸盐氧化-A/O 工艺 (ferrate oxidation-A/O, FO-A/O)，详细考察了不同剩余污泥回流比 (25%、50% 和 100%) 对污泥浓度、污泥活性 (SOUR)、污泥沉降性能 (SVI) 及系统出水水质的影响，重点考察了污泥减量效果和脱氮效果，为实现污泥减量及强化脱氮提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

实验装置由 A/O 工艺模型和 FO 污泥破解装置 2 部分组成 (见图 1)。在 A/O 模型中，缺氧池、好氧池和二沉池有效容积分别为 4.3、16.4 和 11.7 L，缺氧池设搅拌器，以确保泥水均匀混合，好氧池底部设置曝气砂头。FO 污泥破解装置同时具备污泥破解和沉淀 2 个功能，沉淀完成后，调节上清液 pH，上清液经蠕动泵进入进水箱，与污水混合后一同进入 A/O 工艺模型。

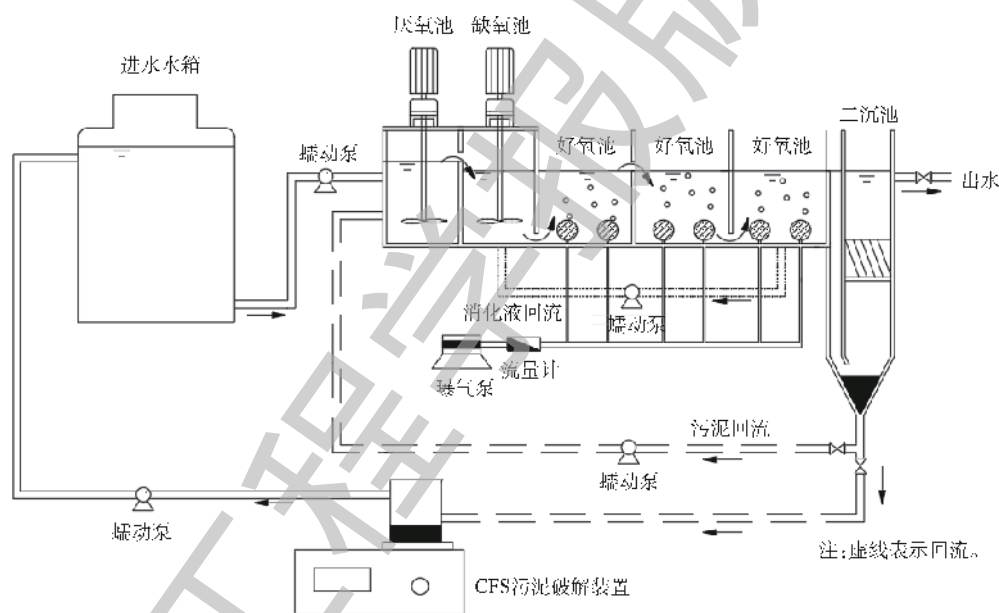


图 1 FO-A/O 实验装置

Fig. 1 Experimental device of the FO-A/O process

1.2 污泥来源及工艺进水

实验所用污泥取自天津市北辰区某污水厂，该厂采用 A²/O 工艺处理生活污水且运行效果良好。工艺进水为模拟生活污水，模拟生活污水由自来水添加葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾及微量元素^[5]配制而成，其水质指标为： $\text{COD}=223.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\text{BOD}_5=126.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\text{TN}=30.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\text{NH}_4^+\text{-N}=29.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\text{NO}_3^-\text{-N}=0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\text{NO}_2^-\text{-N}=0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\text{TP}=3.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\text{pH}=6.0\sim 7.5$ 。

1.3 实验药品

CFS 为实验室自制，其中 FeO_4^{2-} 浓度为 $30.91 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ， ClO^- 浓度为 $38.63 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ， OH^- 浓度为 $90.27 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，其他所用化学药品均为国产分析纯。

1.4 实验方法

将活性污泥接种至 A/O 工艺模型启动装置，待出水 C、N 达到一级 A 标准后调试完成，

A/O 模型运行参数为进水流量 $48 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 、好氧区水力停留时间 8.3 h 、缺氧区水力停留时间 2.1 h ，污泥龄 15 d 、污泥回流比 70% 、消化液回流比 200% 、硝化液回流比 200% 、好氧池溶解氧 $3.5\sim 7.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、缺氧池溶解氧 $0.2\sim 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

实验装置的运行分为 A/O 阶段 (对照组) 和 FO-A/O 阶段, FO-A/O 阶段又分为 3 种工况, 3 种工况下剩余污泥破解回流比 (r) 分别为 25% 、 50% 、 100% , 其中剩余污泥破解回流比指每日被 CFS 破解的剩余污泥与系统排出剩余污泥干重之比。破解剩余污泥时 CFS 投加量按 $50 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (以 Fe^{6+} 计) 投加, 反应时间为 24 h 。

本研究采用污泥产率系数 (Y_{OBS}) 表征系统运行过程中污泥产率的变化, 采用比好氧速率 (SOUR) 表征污泥活性的变化, 二者的计算如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$Y_{\text{OBS}} = \frac{Q_{\text{w}}X_{\text{w}} + (Q - Q_{\text{w}})X_{\text{e}}}{Q(S_0 - S_{\text{e}})} \quad (1)$$

$$U_0 = \frac{\Delta m_{\text{DO}}}{Xt} \quad (2)$$

式中: Y_{OBS} 为污泥产率系数, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Q_{w} 为剩余污泥量, $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$; Q 为进水量, $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$; X_{w} 为剩余污泥浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; X_{e} 为出水悬浮物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; S_0 为进水 SCOD 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; S_{e} 为出水 SCOD 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; U_0 为污泥比耗氧速率, $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; Δm_{DO} 为 DO 减少量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; X 为混合液 SS 浓度, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; t 为测试时间, h 。

1.5 分析方法

MLSS、MLVSS、SVI、SS 均采用重量法测定, COD 采用快速消解法、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、TN、 NO_3^- 、 NO_2^- 均采用分光光度法^[15]测定, 水质指标测定前使用 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤; SOUR 采用膜电极法^[16]测定。

2 结果与讨论

2.1 污泥减量情况

实验研究了在污泥破解回流比 r 分别为 25% 、 50% 和 100% 时的 FO-A/O 工艺的污泥产率系数, 分析了污泥破解回流比对污泥减量效果的影响, 结果如图 2 所示。可以看出, 污泥产率系数 Y_{OBS} 随着 r 的增加而明显降低。 $r=100\%$ 时, $Y_{\text{OBS}}=0.04 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 与 A/O 对照组 ($Y_{\text{OBS}}=0.09 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) 相比减少了 55.56% 。这是由于在 FO-A/O 运行过程中产生的部分剩余污泥被 CFS 溶解细胞破解, CFS 中所含 FeO_4^{2-} 、 ClO^- 以及 OH^- 通过氧化^[17-18]、皂化^[19] 的方式破坏污泥细胞, 释放出胞内物质, 并将难溶的大分子有机物转为容易被微生物所摄取利用的小分子有机物, 最终作为碳源被重新利用, 从而导致 Y_{OBS} 的降低。当 $r=50\%$ 时, $Y_{\text{OBS}}=0.048 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 污泥产量较 A/O 工艺减量 46% , 该工艺的污泥产率系数低于臭氧+A²/O 工艺 ($Y_{\text{OBS}}=0.1 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 K_2FeO_4 +A²/O 工艺 ($Y_{\text{OBS}}=0.21 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)。

2.2 污泥破解回流比对污泥性能的影响

污泥破解液回流至 A/O 系统引入 Fe^{3+} , 可能会对污泥性能产生影响, 因此, 本研究探讨了不

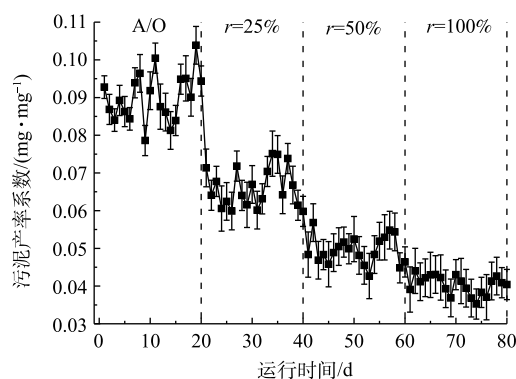


图 2 FO-A/O 工艺中污泥破解回流比对污泥减量效果的影响

Fig. 2 Effect of reflux ratio of disintegrated sludge on waste activated sludge reduction in the FO-A/O process

同剩余污泥破解回流比对 A/O 工艺中污泥浓度、污泥活性和污泥沉降性能的影响, 结果见图 3。由图 3(a) 可知: 随着 r 的升高, 污泥浓度逐渐升高, 这是由于污泥破解液中含有易降解有机物; 随着 r 的增加, 易降解有机物增加, 导致微生物数量增加, 从而使得污泥浓度有所增加。另外, 工艺运行过程中, VSS/SS 变化幅度不大, 维持在 0.74 左右, 表明破解液回流不会造成系统内惰性物质的积累。

实验进一步研究了污泥破解液对污泥活性的影响, 结果见图 3(b), SOUR 的计算方法见式 (2)。由图 3(b) 可知, 当 r 为 25% 和 50% 时, SOUR 分别为 $7.21 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $7.77 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 均较对照组 ($6.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$) 有所提高; 当 r 增加至 100%, SOUR 有所下降。分析其原因是: 一方面, 由于在 r 为 25% 和 50% 时, 适量的 Fe^{3+} 进入 A/O 系统, 好氧条件下, Fe^{3+} 可以作为氧化细胞色素的电子受体, 也可以用于多种酶的合成, 但过高浓度的 Fe^{3+} 会对某些酶的活性产生抑制作用^[20]; 另一方面, 破解液中含有腐殖酸等难被微生物降解利用的物质, 微生物对此类物质降解速率慢, 降解速率决定微生物对水中 DO 的摄取量, 随着此类物质的增加, 对 DO 的摄取量减少, SOUR 降低。回流的 Fe^{3+} 除对 SOUR 产生影响外, 还有助于污泥沉降性能的提高, 结果见图 3(c)。从图 3(c) 可以看出, 随着 r 的增加, SVI 逐渐减小, 这源于破解液中 Fe^{3+} 的絮凝作用, 其改变了污泥絮体的大小和结构, 强化了污泥密度与水密度之间的差异, 使 MLSS 增大, 进而导致 SVI 减小, 改善污泥沉降性能, 从而有利于后续污泥脱水处理。但当 $r=100\%$ 时, 污泥沉降性能较 $r=50\%$ 时变化不大, 这可能是由于此时污泥活性降低所致。

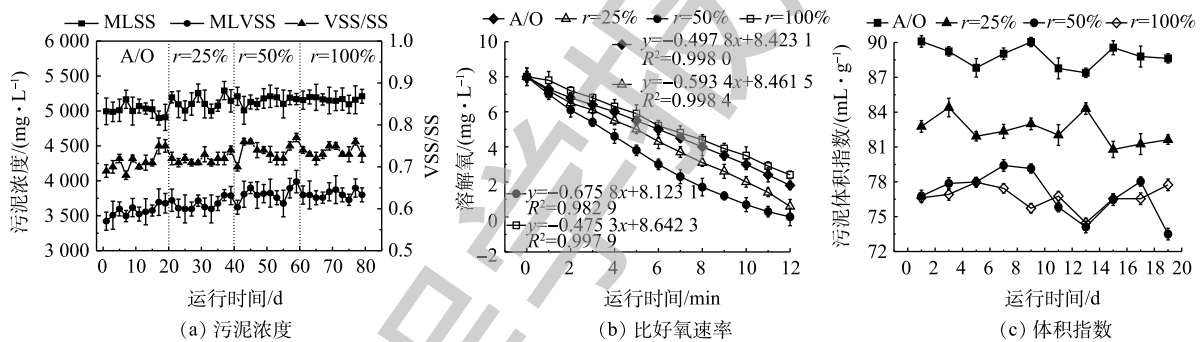


图 3 FO-A/O 工艺中污泥破解回流比对活性污泥性能的影响

Fig. 3 Effect of reflux ratio of disintegrated sludge on sludge properties in the FO-A/O process

2.3 出水水质情况

1) 对有机物的去除效果。COD 与 BOD_5 为常用的有机污染参数, 实验通过测量进出水 COD 与 BOD_5 的变化来研究有机物的去除效果, 结果如图 4 所示。可以看出, 尽管进水 COD、 BOD_5 随着 r 的提高有所增加, 但出水 COD 与 BOD_5 浓度与 A/O 对照组相比基本保持恒定, 均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准排放要求。这表明污泥破解液具有良好的可生化性, 微生物能够较好地适应并降解破解液回流引入的有机物。此外, 在 A/O 对照组和 FO-A/O 工艺运行过程中, 污泥负荷 (F/M) 均低于 $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 处于低负荷状态运行, 低负荷状态下微生物对 COD 和 BOD_5 的去除率较高。

2) FO-A/O 工艺的脱氮效果。氮是导致水体富营养化的主要元素, 也是污水厂深度处理的主要目标物, 实验详细研究了污泥破解液作为碳源时 FO-A/O 工艺对不同形态氮的去除效果, 结果见图 5。由图 5(a)~(d) 可见, 随着 r 的提高, 破解液中大量氮元素进入 A/O 系统, 导致系统氮负荷增加。但在 $r=25\%$ 和 50% 工况时, FO-A/O 系统对 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的脱除效果均优于 A/O 对照组, 由图 5(c) 和图 5(d) 可见, 出水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 相比 A/O 对照组也有所降低, 这表明在 r 为 25% 和 50% 时, 硝化反硝化效率均有所提高。一方面, 这是由于破解液回流改善了系统的 C/N 比, A/O 对照组、

$r=25%$ 和 $r=50%$ 时的 C/N 分别为 7.44、7.56 和 7.79，碳氮比增加为反硝化反应提供了更多的碳源；另一方面， Fe^{3+} 作为一种酶促反应激活剂，提高了微生物体内酶的反应效率^[21]，对硝化和反硝化反应均有一定促进作用。继续增加 r 至 100% 时，氮负荷进一步增大，C/N 降低，脱氮效果较 A/O 对照组下降。从 FO-A/O 工艺运行监测结果可以看出， r 的取值对脱氮效果有明显影响， $r=50%$ 时，TN 的去除率为 68.36%~77.59%。该结果优于臭氧+A²/O 工艺和 K_2FeO_4 +A²/O 工艺，与碱解发酵+A²/O 和机械法+SBR 工艺效果基本相当。由此可见，确定合理的剩余污泥破解回流比是实现污泥减量同步强化脱氮的关键。

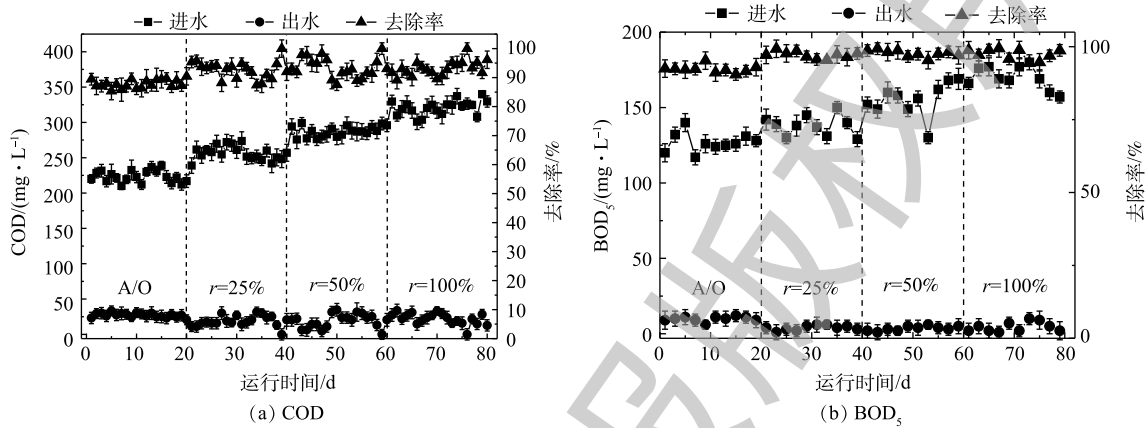


图4 FO-A/O 工艺中污泥破解回流比对 COD 和 BOD_5 的去除效果的影响

Fig. 4 Effect of reflux ratio of disintegrated sludge on COD and BOD_5 removal efficiency in the FO-A/O process

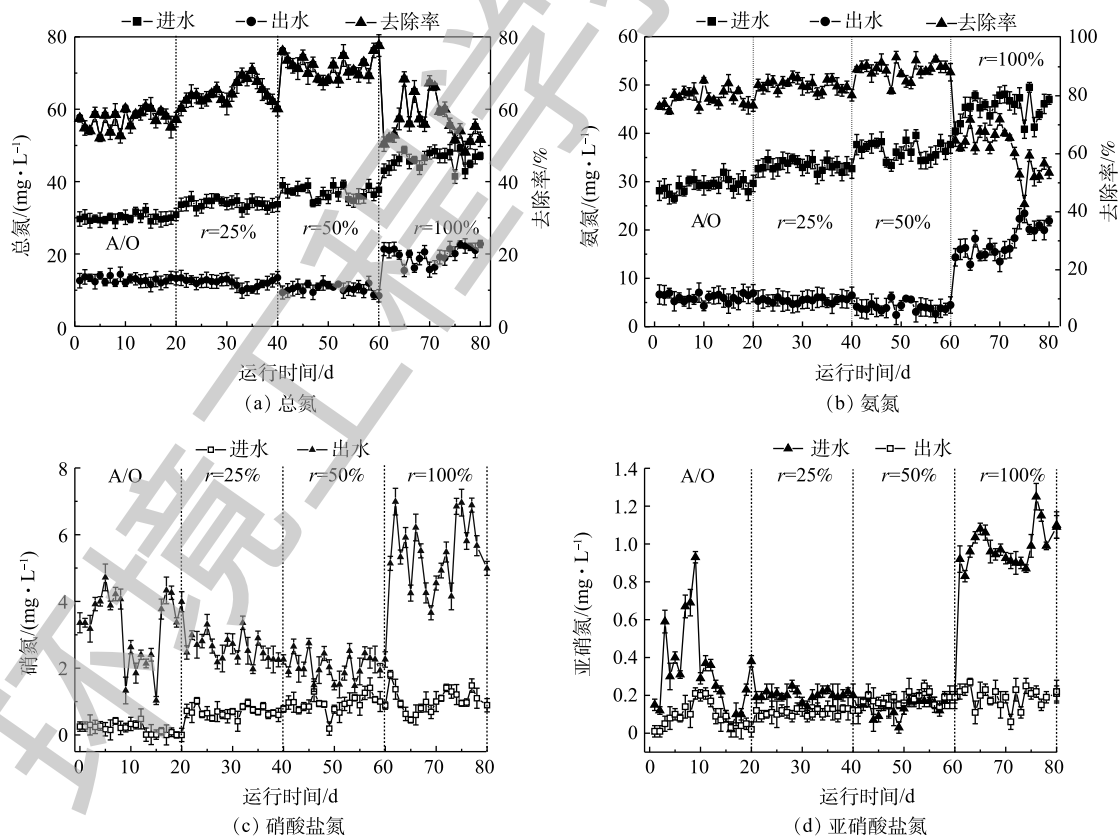


图5 FO-A/O 工艺中污泥破解回流比对脱氮效果的影响

Fig. 5 Effect of reflux ratio of disintegrated sludge on nitrogen removal efficiency in the FO-A/O process

为了进一步证实不同剩余污泥破解回流比下破解液作为补充碳源对反硝化脱氮的强化作用,对进出系统的碳、氮进行物料衡算,其中剩余污泥中的 COD、TN 含量按 $0.80 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.07 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ [22] 计算,衡算的结果如表 1 所示。可以看出,随着 r 的增加,碳矿化率逐渐提高, $r=100\%$ 时,矿化率为 93.13%;对氮而言,在 A/O 对照组及 $r=25\%$ 、 $r=50\%$ 时,随着 r 的增加,矿化率增大, $r=50\%$ 时,氮矿化率为 71.07%,继续增大 r 至 100%,矿化率虽有所降低,但仍高于对照组。另外,由于剩余污泥的破解回流,随剩余污泥排出系统的碳和氮减少。以上计算结果表明,氮矿化率的提高与碳的矿化率相关,证实了污泥破解液回流引入的有机物被反硝化菌利用,起到强化系统脱氮的作用。

表 1 C 和 N 物料衡算

Table 1 Overall mass balances of C and N elements

运行工况	C 的质量/g				N 的质量/g			
	进水	矿化	出水	剩余污泥	进水	矿化	出水	剩余污泥
A/O	214.39	181.73	25.96	6.70	28.84	15.98	12.39	0.47
$r=25\%$	246.31	222.96	18.05	5.30	32.59	20.62	11.60	0.37
$r=50\%$	275.79	253.71	18.18	3.90	35.50	25.23	10.00	0.27
$r=100\%$	308.08	284.43	21.15	2.50	44.16	24.96	19.03	0.17

3) 进出水 TP 浓度变化。由于 CFS 含有大量 Fe^{6+} , Fe^{6+} 在破解污泥过程中被还原为 Fe^{3+} , 而 Fe^{3+} 可以通过混凝、沉淀等方式去除水中的磷[23-24], 为了明确这部分 Fe^{3+} 对 TP 的影响, 在实验中监测了进出水 TP 的变化规律, 如图 6 所示。可以看出, r 为 25% 和 50% 工况时, 进水 TP 负荷稍有提高, 但污泥破解液回流增加了进水碳源, 使得污泥活性提高(图 3(b) 结果), 同时引入 Fe^{3+} , 2 种作用同时作用使得 TP 去除率上升。而当 $r=100\%$ 时, 系统对磷的去除效果急剧恶化, 出水 TP 浓度高于 A/O 对照组。这是由于 $r=100\%$ 时, 全部剩余污泥被溶胞破解回流, 系统进水 TP 负荷升高, 同时污泥活性大幅度降低(图 3(b)), 使得磷在系统中累积[25], 从而使得出水 TP 浓度升高, 出水水质恶化。在最佳回流比条件下, 对 TP 的平均去除率为 39.09%, 高于 $\text{K}_2\text{FeO}_4+\text{A}^2/\text{O}$ 工艺的 32%。

2.4 技术经济分析

运行维修费用在工艺处理系统中占有重要地位, 包括药剂费、人工费、电费、维修费及污泥处理费用。本研究在 A/O 工艺的基础上增加了 CFS 的费用, 1 t 污泥需要投加 Fe^{6+} 0.40 kg, 其药剂成本约为 $169 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$, 相同药剂投加量下市售固体 K_2FeO_4 的药剂成本为 $9\,900 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ (市售 $1\,400 \text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$, 纯度约 20%), 同时由于污泥减量 46%, 因此, 减少了后续 46% 的污泥处理费用(污泥填埋费用约为 $200 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$, 污泥焚烧约为 $100\sim 300 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$, 污泥堆肥为 $90\sim 150 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$), 由此可见, 此方法有一定的应用前景。

3 结论

1) 在传统 A/O 工艺基础上, 增加 FO 污泥减量装置可以取得良好的污泥减量效果, 在 $r=50\%$

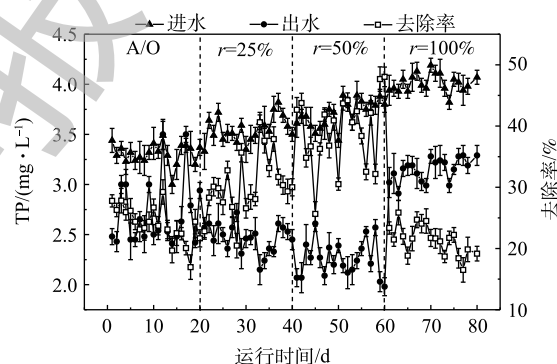


图 6 FO-A/O 工艺中污泥破解回流比对 TP 的去除效果的影响

Fig. 6 Effect of reflux ratio of disintegrated sludge on TP removal efficiency in the FO-A/O process

时, $Y_{OBS}=0.048\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 相比 A/O 工艺, 污泥减量了 46%, 此时出水 COD、TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分别为 18.83、10.43 和 $4.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准排放要求。该工艺中药剂制备成本低于固体 K_2FeO_4 , 且减少了后续污泥处置量, 具有一定的应用前景。

2) 破解液污泥回流增加了进水 SCOD 值, 导致微生物量增加, 污泥浓度提高, 但不会造成系统内惰性物质积累。回流引入的 Fe^{3+} 可改善污泥沉降性, 且适量的 Fe^{3+} 可作为电子受体, 也可用于细胞内多种酶的合成, 促进污泥活性, 但过多 Fe^{3+} 则会产生毒害作用, 导致污泥活性降低。

3) 污泥破解液回流可提高系统 C/N 比, 且 C、N 物料衡算结果表明, 污泥碳源可被反硝化菌有效利用, 起到强化脱氮的效果, 且回流的 Fe^{3+} 对硝化、反硝化反应和除磷均有一定的促进作用, 但 $r=100\%$ 回流会导致 C/N 比降低, 脱氮、除磷效果降低。

参考文献

- [1] WANG X X, WANG S Y, XUE T L, et al. Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage[J]. *Water Research*, 2015, 77(15): 191-200.
- [2] LI Y Y, HU Y Y, WANG G H, et al. Screening pretreatment methods for sludge disintegration to selectively reclaim carbon source from surplus activated sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 255: 365-371.
- [3] SUN H H, WU Q, YU P, et al. Denitrification using excess activated sludge as carbon source: performance and the microbial community dynamics[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 624-632.
- [4] 徐强. 污泥处理处置技术及装置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [5] QIANG Z M, WANG L, DONG H Y, et al. Operation performance of an A/A/O process coupled with excess sludge ozonation and phosphorus recovery: A pilot-scale study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 268: 162-169.
- [6] LIU Y, WANG H L, XU Y X, et al. Sludge disintegration using a hydrocyclone to improve biological nutrient removal and reduce excess sludge[J]. *Separation & Purification Technology*, 2016, 177: 192-199.
- [7] LIU H, HAN P, LIU H B, et al. Full-scale production of VFAs from sewage sludge by anaerobic alkaline fermentation to improve biological nutrients removal in domestic wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260: 105-114.
- [8] KONDO T, TSUNEDA S, EBIE Y, et al. Improvement of nutrient removal and phosphorus recovery in the anaerobic/oxic/anoxic process combined with sludge ozonation and phosphorus adsorption[J]. *Journal of Water & Environment Technology*, 2009, 7(7): 135-142.
- [9] YE F X, LIU X W, YING L. Effects of potassium ferrate on extracellular polymeric substances (EPS) and physicochemical properties of excess activated sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 199(2): 158-163.
- [10] AN Y, ZHOU Z, YAO J, et al. Sludge reduction and microbial community structure in an anaerobic/anoxic/oxic process coupled with potassium ferrate disintegration[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 954-961.
- [11] 张彦平, 李芬, 樊伟, 等. 高铁酸盐溶液破解剩余污泥效能研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(6): 65-69.
- [12] MING X A, FENG Y F, WU J J, et al. Effect of K_2FeO_4 /US treatment on textile dyeing sludge disintegration and dewaterability[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 162: 81-86.
- [13] ZHANG Y P, HU R Q, TIAN J Y, et al. Disintegration of waste activated sludge with composite ferrate solution: Sludge reduction and settleability[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 126-132.
- [14] ZHANG X H, LEI H Y, CHEN K, et al. Effect of potassium ferrate (K_2FeO_4) on sludge dewaterability under different pH conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 210: 467-474.

- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 尹军, 王雪峰, 王建辉, 等. SBR工艺活性污泥比耗氧速率与控制参数的关系[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(7): 481-483.
- [17] WAITE T, GILBERT M. Oxidative destruction of phenol and other organic matter by iron(VI) ferrate[J]. *Water Pollution Control Federation*, 1978, 50(3): 543-551.
- [18] 张智瑞. 小城镇自来水厂消毒技术的研究与选择[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [19] 于子淇. 剩余污泥二级碱解及厌氧消化的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [20] 李慧, 刘健, 左悦. 聚合氯化铝铁对活性污泥系统的影响[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(7): 103-105.
- [21] HENZE M, GUJER W, MATSUO T, et al. Activated sludge model No.2D, ASM2D[J]. *Water Science & Technology*, 1999, 39(1): 165-182.
- [22] 孟顺龙, 裘丽萍, 陈家长, 等. 污水化学沉淀法除磷研究进展[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(35): 264-268.
- [23] 胡猛, 曹军, 张艳, 等. 化学除磷辅助A²/O工艺处理城市污水脱氮除磷研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(3): 29-33.
- [24] MAGER T R, LANDES J D, MOON D M, et al. Effect of low frequencies on the fatigue crack growth characteristics of A533 grade B class 1 plate in an environment of high-temperature primary grade nuclear reactor water. Heavy section steel technology technical report No.35[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017, 5(2): 1828-1842.
- [25] ZUBROWSKA-SUDOL M, WALCZAK J. Enhancing combined biological nitrogen and phosphorus removal from wastewater by applying mechanically disintegrated excess sludge[J]. *Water Research*, 2015, 76: 10-18.

(本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

Sludge reduction and enhanced nitrogen removal in ferrate oxidation-A/O process

ZHANG Yanping^{1,2,*}, LI Lingchong^{1,2}, LU Guangping¹, ZHANG Qian¹

1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China

*Corresponding author, E-mail: zyphit@163.com

Abstract The A/O process coupled with composite ferrate oxidation (i.e. FO-A/O process) was designed to reduce waste activated sludge (WAS) and enhance nitrogen removal. The experiments were conducted for the simulated domestic sewage treatment. The effects of the reflux ratios of disintegrated sludge on sludge reduction and denitrification enhancement in FO-A/O process were investigated and compared. Meanwhile, a comprehensive assessment on the effluent quality and sludge properties was performed. The results showed that sludge yield coefficient (Y_{OBS}) was $0.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, the most reduction for WAS occurred with a value of 46% at the disintegrated sludge reflux ratio of 50%, and the removal rates of TN and NH_4^+-N reached 71.7% and 88.8%, respectively. The disintegrated sludge supernatant had good biodegradability, which could be effectively utilized as carbon source by denitrifying bacteria and improve the rate of nitrogen removal. Under this operation condition, the sludge concentration (MLSS and MLVSS) and sludge activity (SOUR) increased, and the sludge settleability was ameliorated as well. In addition, the iron induced by WAS disintegrated supernatant improved TP removal to some degree. In summary, the FO-A/O process could effectively improve the removal rate of pollutants and realize the purpose of simultaneous intensified denitrification and sludge reduction.

Keywords carbon source for denitrification; sludge reduction; nitrogen removal; ferrate oxidation-A/O process