

污水处理与回用

曹亚丽, 王霞, 胡凯, 等. 水力停留时间对改良型 AAO-MBR 工艺处理夏季农村生活污水的影响[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 58-62, 86.

CAO Y L, WANG X, HU K, et al. Effect of HRT on performance of modified AAO-MBR process for rural domestic wastewater treatment in summer[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 58-62, 86.



扫我试试?

水力停留时间对改良型 AAO-MBR 工艺处理夏季农村生活污水的影响

曹亚丽¹, 王霞¹, 胡凯², 孙杏², 侯克锁¹

(1. 华设设计集团环境科技有限公司, 江苏南京 210014; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098)

摘要 水力停留时间(HRT)是影响 AAO 工艺脱氮除磷效率的重要因素。采用改良型 AAO-MBR 工艺处理某农村生活污水, 考察了夏季时 HRT 对处理装置出水效果的影响。试验结果表明, 该工艺对低浓度农村生活污水中 COD_{Cr} 、氨氮的去除效果较稳定, 平均去除率分别为 69.50%、98.90%。TN 去除率为 26.50%~56.60%, 随厌氧段和缺氧段 HRT 增加而显著提高。TP 去除率随好氧段 HRT 增大而增大, 随缺氧段 HRT 增大呈现先增大后减小的趋势。厌氧段、缺氧段、好氧段适宜 HRT 分别为 2.0、4.0、10.0 h, 此条件下装置出水 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP 质量浓度分别为 38、0.104、8.73、0.42 mg/L, 稳定达到江苏省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462—2020)一级 A 标准。

关键词 改良型 AAO-MBR 工艺 农村生活污水 脱氮除磷 水力停留时间 有机物去除

中图分类号: X799.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)02-0058-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.02.009

Effect of HRT on Performance of Modified AAO-MBR Process for Rural Domestic Wastewater Treatment in Summer

CAO Yali¹, WANG Xia¹, HU Kai², SUN Xing², HOU Kesuo¹

(1. China Design Group Environment Technology Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Hydraulic retention time (HRT) is an important factor for the efficiency of nitrogen and phosphorus removal in AAO process. The modified AAO-MBR was adopted to treat rural domestic wastewater, and the effect of HRT on effluent performance in summer was investigated. Results showed that COD_{Cr} and ammonia nitrogen were stably removed by this process, average removal rates of COD_{Cr} and ammonia nitrogen were 69.50% and 98.90%, respectively. The removal rate of TN was 26.50%~56.60%, which increased significantly with the increase of HRT in anaerobic and anoxic sections. Meanwhile, the removal rate of TP increased with the increase of HRT in the aerobic section, and showed an initially increasing and then decreasing trend as the HRT of anoxic section increased. Under optimum HRT of 2.0, 4.0, 10.0 h in anaerobic, anoxic, and aerobic sections, the effluent concentrations of COD_{Cr} , ammonia nitrogen, TN and TP were 38, 0.104, 8.73, 0.42 mg/L, respectively, which satisfied first grade A criteria of *Discharge Standard of Water Pollutants for Rural Domestic Sewage Treatment Facilities* (DB 32/3462—2020) in Jiangsu Province.

Keywords modified AAO-MBR process rural domestic wastewater nitrogen and phosphorus removal hydraulic retention time (HRT) organic matter removal

[收稿日期] 2020-12-07

[作者简介] 曹亚丽(1981—), 女, 高级工程师, 主要从事水环境治理方面工作, E-mail: 782970622@qq.com。

截至 2020 年,我国农村生活污水年排放量接近 233 亿 $t^{[1]}$ 。由于污水处理设施匮乏、运行管理不善、村民环保意识薄弱等,大部分污水未经处理直接排入地表水体,造成农村水环境污染。近年,国家先后公布并施行《中华人民共和国水污染防治法(修改版)》《村庄整治技术标准》《农村生活污水处理设施技术标准》等政策条例,不断加大农村污水治理力度。但现阶段农村污水处理技术研发集中在城镇污水方面,对于排放量小、排放点分散、水质差异大、水量变化系数大的分散式农村生活污水及其处理技术的研发与应用尚处于起步阶段。

农村生活污水主要包括厨房污水、生活洗涤、沐浴污水和厕所污水。研究表明^[2-5],农村污水污染物浓度变化较大, BOD_5 质量浓度为 70~250 mg/L, COD_{Cr} 质量浓度为 80~500 mg/L,pH 值为 6~8,冲厕废水中 N、P 等浓度较高。

膜生物反应器(MBR)是 20 世纪末兴起的新型水处理技术,具有出水水质优质稳定、剩余污泥产量少、占地面积小、易于自控等特点,适宜作为分散式污水处理技术。但该工艺脱氮除磷效果有限,面对

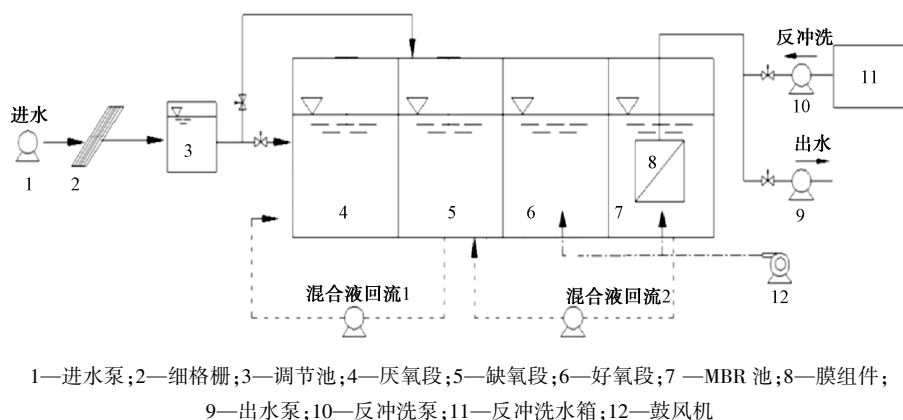
农村生活污水处理要求,需要将 MBR 工艺与 AAO 工艺(或 AAO 变形工艺)耦合,不仅可弥补 MBR 在脱氮除磷方面的不足,而且可利用膜组件取消 AAO 工艺的二沉池,实现固体停留时间(SRT)和水力停留时间(HRT)完全分离,有效解决了 AAO 工艺污泥产量高、SRT 短的问题^[6-7]。

针对低浓度农村生活污水,AAO-MBR 组合工艺的处理效果与运行优化有待研究。HRT 是影响 AAO 工艺脱氮除磷效率的关键因素,但其对于组合工艺的影响研究较少。因此,本文采用改良型 AAO-MBR 组合工艺处理江苏省某农村生活污水,考察生化段 HRT 对组合工艺处理效果的影响。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置及运行条件

改良型 AAO-MBR 试验装置如图 1 所示。装置采用焊接钢板,处理量为 10 m^3/d ,长×宽×高=4.2 m×1.5 m×3.0 m,其中厌氧段、缺氧段、好氧段和膜池容积分别为 0.83、1.67、5.00 m^3 和 4.50 m^3 。膜池采用 PVDF 中空纤维膜组件,膜孔径为 0.1 μm ,膜架高度为 1.4 m。



1—进水泵;2—细格栅;3—调节池;4—厌氧段;5—缺氧段;6—好氧段;7—MBR 池;8—膜组件;
9—出水泵;10—反冲洗泵;11—反冲洗水箱;12—鼓风机

图 1 改良型 AAO-MBR 装置工艺流程图

Fig. 1 Flow Diagram of Modified AAO-MBR Process

来自某乡村排水管网的污水由调节池经潜污泵提升后,依次流经厌氧段、缺氧段和好氧段,最后进入膜池,经膜过滤后出水(图 1),采用鼓风机向好氧段及膜池曝气。装置设置两套回流系统,一套将缺氧段混合液回流至厌氧段,回流比为 50%,补充生化池流失的污泥,类似 AAO 工艺的外回流作用。该工艺采用了从缺氧段到厌氧段的混合液回流,混合液中含有较多的溶解性 BOD_5 ,而硝酸盐很少,为厌

氧段内有机物水解反应提供适宜条件。另一套将膜池混合液回流至缺氧段,回流比为 100%,进行反硝化脱氮,类似 AAO 工艺的内回流作用。该工艺采用膜池污泥先回流至缺氧段,再通过缺氧段混合液回流至厌氧段的方式,完成回流膜池污泥至厌氧段的目的,这种间接回流污泥至首段补充生化池流失污泥的做法可以防止硝酸盐进入厌氧段,破坏厌氧段的厌氧状态而影响系统的除磷率。

装置采用连续流,通过电磁阀控制进出水阀门的启闭,从而控制各生化池水深,实现不同工艺段 HRT 的变化。好氧段气水体积比为 10:1,膜池气水体积比为 15:1,均采用连续曝气,膜通量为 17.36

$L/(m^2 \cdot h)$,缺氧段至厌氧段回流比为 50%,膜池至缺氧段回流比为 100%。试验在 MBR 装置稳定运行(40 d)后开展,不同 HRT 下具体试验条件如表 1 所示。

表 1 不同 HRT 下的具体试验条件
Tab. 1 Specific Test Conditions under Different HRT

HRT/h			运行时间/d	温度/℃	进水水质				MLSS/(g·L ⁻¹)	SRT/d
厌氧池	缺氧池	好氧池			COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)		
2.0	4.0	6.0	3	25	98	17.300	18.20	0.50	2.5	20
2.0	4.0	8.0	3	26	107	12.900	19.30	1.00	2.5	20
2.0	4.0	10.0	3	26	134	12.300	20.10	1.10	2.5	20
2.0	2.0	12.0	3	28	113	15.300	18.50	0.70	2.5	20
2.0	3.0	12.0	3	30	98	16.200	20.10	0.80	2.5	20
1.0	4.0	12.0	3	28	94	13.800	19.80	0.90	2.5	20
2.0	4.0	12.0	3	28	125	10.100	21.40	1.20	2.5	20

1.2 农村生活污水水质

装置进水来自江苏某乡村排水管网,主要收集附近农户生活污水。试验期间,装置进水水温为 25~30℃,pH 值为 6.5±0.5,COD_{Cr}、氨氮、TN 和 TP 日均质量浓度分别为(110±20)、(14.000±4.000)、(19.60±1.80)mg/L 和 (0.89±0.36)mg/L,该地区农村生活污水具有有机物浓度低、碳氮比较低等特征。

1.3 水质指标与分析方法

COD_{Cr}、氨氮、TN、TP 等水质指标测定方法参照国标^[8],水样 pH 采用 pH 计测定(pHS-3C,上海雷磁)。

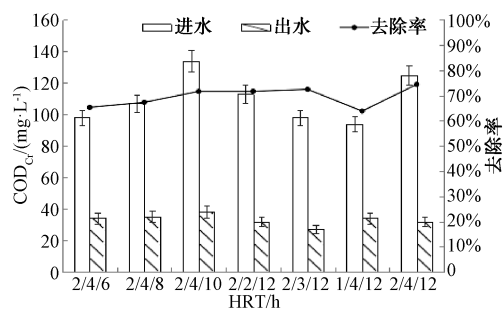
2 结果和讨论

在低浓度农村生活污水条件下,改变各生化段 HRT,装置稳定运行后,污染物去除效果如图 2~图 5 所示。

2.1 HRT 对 COD_{Cr} 去除的影响

由图 2 可知,不同 HRT 条件下,装置出水 COD_{Cr} 质量浓度为 27~38 mg/L,稳定达到江苏省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462—2020)一级 A 标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。

试验期间,COD_{Cr} 去除率随厌氧段和缺氧段



注:横坐标轴数值分别表示厌氧段、缺氧段和好氧段的 HRT

图 2 不同 HRT 下的 COD_{Cr} 去除效果

Fig. 2 Removal Effect of COD_{Cr} under Different HRT

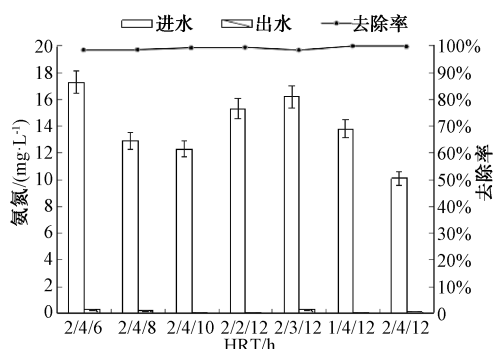
HRT 增大而增大,COD_{Cr} 平均去除率为 69.50%,与郭耀杰等^[9]研究结果一致。朱星等^[10]研究了 HRT 对倒置 AAO-MBR 组合工艺中 COD_{Cr} 去除效果的影响,当进水 COD_{Cr} 平均质量浓度为 274 mg/L 时,在缺氧段 HRT 分别为 1.5、3.7 h 时,系统 COD_{Cr} 去除率均在 90.00% 以上,优于本试验结果。原因可能是后者的 MBR 反应器污泥浓度较高,以及进水中有机物形态不同,膜对大分子有机物具有截留作用,使大分子有机物与微生物接触时间增加,强化了系统对有机物的去除。

随着好氧段 HRT 的增大,COD_{Cr} 去除率先增大后趋于稳定。好氧段 HRT 从 6.0 h 增至 12.0 h 时,装置出水 COD_{Cr} 质量浓度均稳定在 35 mg/L 左右,因此,出水剩余 COD_{Cr} 主要是难生物降解或微生物

内源呼吸的残留物。汪浩等^[11]采用 AAO-MBR 工艺处理城镇生活污水,发现好氧段 HRT 从 3.6 h 增加到 10.8 h 的过程中, COD_{Cr} 去除率逐渐增大,但增幅较小,与本试验结果一致。

2.2 HRT 对氨氮去除的影响

由图 3 可知,不同 HRT 条件下,装置出水氨氮质量浓度为 0.029 ~ 0.295 mg/L,稳定达到江苏省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462—2020)一级 A 标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。



注:横坐标轴数值分别表示厌氧段、缺氧段和好氧段的 HRT

图 3 不同 HRT 下的氨氮去除效果

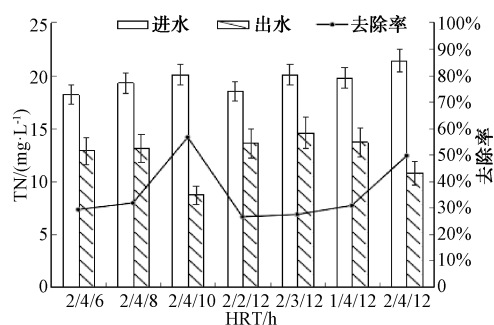
Fig. 3 Effect of Ammonia Nitrogen Removal under Different HRT

试验表明,厌氧段和缺氧段 HRT 对氨氮去除影响不大,与刘哲等^[12]研究结果一致。氨氮去除率较稳定(98.29% ~ 99.79%),平均去除率为 98.97%。可能是因为膜池排泥周期较长,污泥龄较大,系统内富集了较多硝化菌,有利于将进水氨氮氧化为硝态氮^[1]。氨氮去除率随好氧段 HRT 增加略有提高,与杨胤等^[13]研究结果一致。这是因为好氧段 HRT 增加使得好氧段微生物特别是硝化细菌具有充足的生长时间,硝化反应较彻底。

2.3 HRT 对 TN 去除的影响

由图 4 可知,不同 HRT 条件下,装置出水 TN 质量浓度为 8.73 ~ 14.60 mg/L,稳定达到江苏省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462—2020)一级 A 标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。

试验条件下, TN 去除率为 26.49% ~ 56.57%,平均去除率为 35.96%, HRT 变化对 TN 去除效果影响较大。TN 去除率随厌氧段 HRT 增大显著提高,可能因为当厌氧段 HRT 较小(1.0 h)时,反硝化无



注:横坐标轴数值分别表示厌氧段、缺氧段和好氧段的 HRT

图 4 不同 HRT 下的 TN 去除效果

Fig. 4 Effect of TN Removal under Different HRT

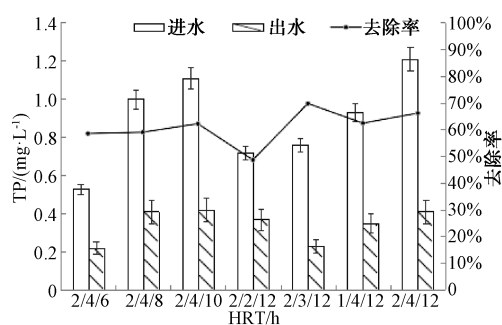
法反应完全,延长厌氧段 HRT 后, TN 去除率逐渐上升,但与朱星等^[10]研究结果(TN 平均去除率为 69.51%)相比,本研究 TN 去除率偏低。彭永臻等^[14]研究表明,当进水 COD_{Cr} 质量浓度为 211 mg/L、C/N 为 4.0 ~ 7.0 时, TN 可得到较好去除(去除率为 78.00%)。而本试验进水 COD_{Cr} 质量浓度为 110 mg/L、C/N 为 5.6,可能因为进水碳源不足限制了 TN 的去除效果。张娟^[15]研究表明,改良型 AAO 工艺脱氮的限制因素不在于硝化反应,而是由反硝化过程决定,在进水 COD_{Cr} 质量浓度为 210 mg/L、TN 质量浓度为 35.00 mg/L 的条件下,缺氧段 HRT 为 3.0 h 时,基本能满足反硝化要求,之后继续增加缺氧段 HRT 对反硝化的影响很小,与本试验结果一致。

好氧段 HRT 从 6.0 h 增至 10.0 h 后, TN 去除率增加了 26.00%,可能因为硝化细菌世代周期长,较长的 HRT 使硝化细菌得到有效富集,保证硝化反应彻底进行,回流到缺氧段的硝化液中硝态氮浓度更大,使得反硝化菌得到有效增殖。当好氧段 HRT 为 12.0 h 时, TN 去除率明显降低,因为 HRT 越大,有机负荷越低,由于反硝化菌属于化能异养菌,较长的 HRT 可能导致活性污泥发生内源呼吸,使得污泥浓度降低,影响反硝化效果^[16]。

2.4 HRT 对 TP 去除的影响

由图 5 可知,不同 HRT 条件下,装置出水 TP 质量浓度为 0.22 ~ 0.42 mg/L,稳定达到江苏省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462—2020)一级 A 标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。

图 5 表明,增大厌氧段 HRT, TP 去除率增大,与



注:横坐标轴数值分别表示厌氧段、缺氧段和好氧段的 HRT

图 5 不同 HRT 下的 TP 去除效果

Fig. 5 Effect of TP Removal under Different HRT

沈阳等^[17]结论一致。因为活性污泥在厌氧条件下会发生内源呼吸,释放自身基质,使厌氧段有机底物浓度升高,为厌氧释磷提供了充足的碳源,上述内源呼吸随厌氧停留时间增大而增大。此外,徐荣乐等^[18]研究发现,AAO 工艺中厌氧段 HRT 不宜过长(不宜超过 3.0 h),否则将导致聚磷菌二次释磷,此时这类细菌将不能积累聚 β -羟基丁酸酯(PHB),从而影响其在好氧段的吸磷效果。另外,增大缺氧段 HRT,TP 去除率呈现先增大后减小的趋势,厌氧段、好氧段 HRT 一定时,缺氧段 HRT 为 3.0 h 的 TP 去除率最高(69.70%)。潘欣语等^[19]研究表明,缺氧段 HRT 增大,TP 去除率不一定升高,而是呈现先升高后降低的变化趋势,与本试验结果一致。这是因为适当增大缺氧段 HRT 有利于提高反硝化聚磷菌数量,强化反硝化吸磷作用,但缺氧段 HRT 过大,在碳源有限的情况下,反硝化菌与聚磷菌形成竞争关系,而聚磷菌对于碳源的要求严于反硝化菌,即易降解有机物优先被反硝化菌利用,导致聚磷菌吸附的碳源较少,不利于吸磷作用。

好氧段 HRT 从 6.0 h 增至 12.0 h 时,TP 去除率逐渐增大,厌氧段、缺氧段 HRT 一定时,好氧段 HRT 为 12.0 h 的 TP 去除率最高(66.10%)。研究表明^[19],在低碳源条件下,虽然聚磷菌在厌氧、缺氧阶段释磷不充分,但在好氧段 HRT 较长且曝气充足的条件下仍能过量吸收磷。此时,聚磷菌在好氧条件下过量吸磷的能量来源,既包括厌氧释磷时形成的 PHB 等细胞能源物质氧化分解而产生的能量,也包括来自好氧代谢过程中多余的能量。

3 结论

本试验采用改良型 AAO-MBR 工艺处理低浓度

农村生活污水,结论如下。

(1) 改良型 AAO-MBR 工艺中,HRT 变化对 COD_{Cr} 、氨氮去除效果影响不大, COD_{Cr} 、氨氮去除效果较稳定,平均去除率分别为 69.50%、98.97%。

(2) 改良型 AAO-MBR 工艺中,不同 HRT 条件下,TN 去除率为 26.49%~56.57%,TP 去除率为 48.60%~69.70%。TN 去除率随厌氧段和缺氧段 HRT 增大而显著提高,TP 去除率随缺氧段 HRT 增大而呈现先增大后减小的趋势。

(3) 综合考虑污染物去除效果,提出改良型 AAO-MBR 工艺处理低浓度农村生活污水时,厌氧段、缺氧段、好氧段最佳 HRT 分别为 2.0、4.0、10.0 h,此条件下 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP 去除率分别为 71.64%、99.15%、56.57%、62.16%,装置出水各污染物质量浓度分别为 38、0.104、8.73、0.42 mg/L,稳定达到江苏省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级 A 标准。

参考文献

- [1] 徐文江,刘芳,李安峰,等. 农村生活污水排放标准的探讨[J]. 环境保护, 2021, 49(22): 61-65.
- [2] 张翠荣,王晓苗. 新型农村污水处理技术的适用性分析[J]. 水资源开发与管理, 2017(6): 18-22.
- [3] 周勇. 浅谈农村生活污水现状分析及处理工艺[J]. 泸天化科技, 2017(2): 84-88.
- [4] 丁红,杨家萍. 分析农村生活污水治理现状及对策[J]. 农业与技术, 2019, 39(7): 82-83.
- [5] 唐晓琳,李妍,李华. 我国农村污水处理技术研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(12): 96-98.
- [6] 杨春雪,施春红,张喜玲. 膜生物反应器处理农村生活污水研究进展[J]. 水处理技术, 2020, 46(8): 1-5.
- [7] 林钊洪. 农村生活污水分散型处理组合工艺的选用[J]. 环境与发展, 2018, 30(6): 83-84.
- [8] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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.
- [9] 郭耀杰,鲁建江,童延斌,等. 水力停留时间对氧化沟处理农村污水的影响[J]. 水处理技术, 2019, 45(3): 106-110.
- [10] 朱星,郑晓英,朱宁伟,等. 延长缺氧区水力停留时间提高倒置 AAO/MBR 组合工艺的脱氮效果[J]. 净水技术, 2017, 36(1): 67-72.
- [11] 汪浩,刘操,马宁,等. 基于再生水厂提标改造的 AAO-MBR 工艺试验研究[J]. 给水排水, 2015, 51(1): 70-75.
- [12] 刘哲,邵小青,侯荣荣,等. HRT 对一体化污水处理装置脱氮除磷效果的影响[J]. 水处理技术, 2018, 44(4): 95-97.

(下转第 86 页)

出现。相比上一年相同月份,没有加入模糊控制模型时,处理相同流量的污水,PAC 与 PAM 两种药剂的用量减少约 1/3。

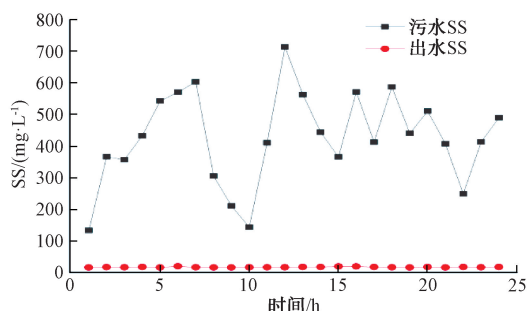


图 10 使用模糊控制模型后的进出水 SS 含量

Fig. 10 SS Concentration after Fuzzy Control Model Used

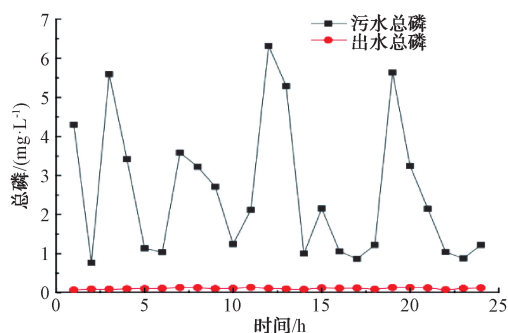


图 11 使用模糊控制模型后的进出水总磷含量

Fig. 11 Total Phosphorus Concentration after Fuzzy Control Model Used

6 结论

由图 9 可知,本文构建的模糊控制模型单位阶跃响应超调量较小,控制过程无震荡现象且保持平稳状态。PID 模型对参数变化敏感,性能不稳定,而采用本文设计的模糊控制模型可以使整个控制系统更稳定,超调量更小,响应时间更快。

基于 PLC 与模糊控制结合的特点,通过现场试验分析得出,加入模糊控制技术提高了控制系统的稳定性,该系统比传统 PLC 控制对药剂的投加控制

更加精确,更能满足在磷矿污水处理中除磷的要求,今年丰水期 7 月—9 月药剂使用量比上一年同月份减少约 1/3,整个控制系统更加具备经济性。验证表明了将模糊控制技术应用到磷矿废水除磷控制系统中的可行性及有效性。

参考文献

- [1] 夏丽丽. 基于 T-S 模糊模型的复杂动态网络系统的稳定性分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [2] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [3] 吴景来, 李家春, 陈跃威, 等. 模糊控制模型在水肥一体化中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 11-14, 19.
- [4] 黄超, 薄翠梅, 郭伟, 等. 工业污水处理溶解氧的双模糊控制系统研究[J]. 控制工程, 2019, 26(2): 185-190.
- [5] 张俊杰. 异构双腿机器人模糊控制系统设计与步态实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [6] 刘桂涛, 张天凡, 李哲. 基于模糊控制的变频调速节能技术在污水处理中的应用[J]. 现代电子技术, 2017, 40(7): 135-138.
- [7] 王敏林, 刘载文. 污水处理过程多变量控制方法研究[J]. 计算机与应用化学, 2013, 30(12): 1422-1426.
- [8] 梁昔明, 周威, 李山春. 基于模糊控制的污水曝气系统的研究[J]. 控制工程, 2012, 19(2): 328-331, 354.
- [9] 王小艺, 刘萌, 刘载文, 等. 生物流化床污水处理智能控制系统设计与实现[J]. 微计算机信息, 2012, 28(8): 4-5, 16.
- [10] 戴倩, 侯燕洪, 刘俊杰, 等. 模糊控制在 SBR 污水处理中的应用[J]. 自动化与仪表, 2011, 26(7): 42-44, 54.
- [11] 李丽荣, 杜小巍, 赵树国. 基于 PLC 的城市生活污水处理模糊控制系统[J]. 软件工程与应用, 2018, 7(2): 91-98.
- [12] NAHM E S. A study on fuzzy control method of energy saving for activated sludge process in sewage treatment plant [J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2018, 67(11): 1477-1485.
- [13] 牛寅, 张侃谕. 基于云模型模糊推理的精准施肥机 pH 值调节过程控制[J]. 农业机械学报, 2016, 44(6): 2-6.

(上接第 62 页)

- [13] 杨胤, 赵静, 王田天, 等. 体积比对改良 AAO-同步脱氮除磷装置去除效果的影响[J]. 水处理技术, 2016, 42(4): 91-95.
- [14] 彭永臻, 潘聪, 孙事昊, 等. 进水碳氮比对中试 AAO-BAF 系统脱氮除磷性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(9): 904-910.
- [15] 张娟. A²O 工艺在污水处理中的优化研究[J]. 化学工程师, 2017, 31(2): 43-49.

- [16] 陈阳, 张磊. 高氨氮浓度下改良型倒置 AAO 工艺的脱氮性能研究[J]. 环境保护科学, 2017, 43(4): 68-71.
- [17] 沈阳, 王电站, 周立祥. 倒置 AAO 池容比对猪场消化液脱氮除磷的影响[J]. 水处理技术, 2020, 46(3): 119-123.
- [18] 徐荣乐, 樊耀波, 张晴, 等. AAO-MBR 研究与应用进展[J]. 膜科学与技术, 2013, 33(6): 111-118.
- [19] 潘欣语, 杨建宇, 李永峰. 水力停留时间对 AAO 工艺脱氮除磷效率的作用[J]. 黑龙江科学, 2011, 2(4): 1-4.