

王文娜, 诸大宇. 改良多级 AO-MBR 工艺在生活污水处理中的运行参数试验[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 115–123, 179.

WANG W N, ZHU D Y. Experiment on operation parameters of improved multistage AO-MBR processes in domestic wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 115–123, 179.

改良多级 AO-MBR 工艺在生活污水处理中的运行参数试验

王文娜, 诸大宇*

(北京蓝源恒基环保科技有限公司, 北京 100029)

摘 要 【目的】随着我国污水氮磷排放标准的日益严格, 多级缺氧/好氧(AO)-膜生物反应器(MBR)工艺运行能耗低、脱氮效率高、占地面积小、碳源投加量低、无需硝化液回流的优势逐渐受到业内学者的关注。【方法】为了探究改良多级 AO-MBR 工艺在生活污水高效脱氮除碳的最优运行参数, 设计搭建新型改良多级 AO-MBR 中试试验装置, 采用四级 AO 串联, MBR 池替代末端好氧池, 通过增加消氧池对多级 AO-MBR 工艺进行改良, 采用改良工艺对农村生活污水进行试验研究, 对比分析好氧池不同溶解氧(DO)浓度和缺氧池不同进水分分配比条件下, 工艺对有机物(COD)、氨氮和总氮的去除效率。【结果】在缺氧池 1: 缺氧池 2: 缺氧池 3: 缺氧池 4 的进水流量分配比为 30%: 25%: 25%: 20% 时, 随着 DO 浓度的降低, 工艺对总氮的去除效率逐渐提升, 在好氧池 DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L 时, 工艺对总氮的去除效果较好, 总氮平均去除率为 90.4%; 在好氧池 DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L, 缺氧池进水流量分配比为 25%: 25%: 25%: 25% 时, 无需投加碳源, 工艺对总氮去除效率最佳, 总氮平均去除效率为 91.1%。【结论】改良多级 AO-MBR 工艺在等比例进水和好氧池低曝气量时, 对污染物的去除效率最高, 同时节约碳源投加费用和曝气运行能耗, 在高排放标准生活污水处理中值得推广的优良工艺。

关键词 多级缺氧/好氧-膜生物反应器(AO-MBR) 溶解氧 进水分分配比 总氮 生活污水

中图分类号: X703.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)10-0115-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.013

Experiment on Operation Parameters of Improved Multistage AO-MBR Processes in Domestic Wastewater Treatment

WANG Wenna, ZHU Dayu*

(Beijing Lanyuan Hengji Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract [Objective] With the increasingly stringent national standards for nitrogen and phosphorus emissions from wastewater in China, the advantages of the multi-stage anoxic/oxic (AO)-membrane bioreactor (MBR) process, such as low operating energy consumption, high nitrogen removal efficiency, small land area, low carbon source dosage, and no need for nitrification liquid reflux, have gradually attracted the attention of scholars in the industry. [Methods] In order to explore the optimal operating parameters of improved multistage AO-MBR process for efficient nitrogen and carbon removal in domestic wastewater, a new improved multi-stage AO-MBR pilot test device was designed and constructed, utilizing a four-stage AO series connection and replacing the terminal aerobic tank with an MBR tank. The multi-stage AO-MBR process was improved by adding oxygen elimination tank, and the experimental study on rural domestic wastewater was carried out by using the improved process. The removal rate of organic matter (COD), ammonia nitrogen and total nitrogen was compared and analyzed under the conditions of different DO concentration in aerobic tank and different influent distribution ratio in anoxic tank. [Results] The results showed that when the influent flow distribution ratio among anoxic tank 1: anoxic tank 2: anoxic tank 3: anoxic tank 4 was 30%: 25%: 25%: 20%, the removal rate of total nitrogen gradually increased with the decrease of DO concentration. When the mass concentration of DO in the aerobic tank was from 0.5 mg/L to 1.0 mg/L, the removal rate of total nitrogen was good, and the average removal rate of total nitrogen was 90.4%. When the mass concentration of DO in the aerobic tank was from 0.5 mg/L to 1.0 mg/L and the influent flow distribution ratio among the anoxic tanks

[收稿日期] 2024-04-09

[作者简介] 王文娜(1987—), 女, 工程师, 研究方向为污水处理技术, E-mail: wwn_happy@126.com。

[通信作者] 诸大宇(1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为污水处理工艺技术, E-mail: zhudayu@126.com。

was 25% : 25% : 25% : 25%, there was no need to add carbon source, the process had the best total nitrogen removal rate, and the average total nitrogen removal rate was 91.1%. [**Conclusion**] The improved multistage AO-MBR process has the best pollutant removal rate when the water intake and aerobic tank are at the same proportion and the aeration rate is low. At the same time, the cost of carbon source addition and aeration operation energy consumption are saved. It is an excellent technology worth promoting in the treatment of domestic wastewater with high discharge standard.

Keywords multistage anoxic/oxic-membrane bioreactor (AO-MBR) dissolved oxygen (DO) influent distribution ratio total nitrogen (TN) domestic wastewater

生活污水主要来源于厨房、洗衣、洗浴、厕所粪便及畜禽养殖等用水^[1]。生活污水主要污染物包括 COD、氮、磷等营养物质及病菌,一般不含有毒污染物,碳氮比(C/N)低,可生化性好^[2]。生活污水中的氮是引起水体富营养化的重要元素之一,如何高效地去除污水中的氮元素,是污水处理行业面临的重点和难点问题^[3]。据统计,全国31个省份均已颁布了地方农村生活污水处理设施水污染物排放标准,新标准对污水中的 COD、氨氮、总氮和总磷等水质指标提出了更高的要求^[4]。传统的脱氮生物处理工艺,包含缺氧/好氧(AO)、厌氧/缺氧/好氧(AAO)、序批式活性污泥法(SBR)、氧化沟等工艺,生物脱氮需长污泥龄(SRT)、充足碳源、合适的污泥回流比和硝化液回流比、受碳源不足和硝化液回流比限制,脱氮效率难以进一步提升、需通过投加外部碳源来提高脱氮效率,但会导致运行成本较高^[5]。

为了解决传统生物处理工艺存在的上述问题,学者们^[6-7]开发出分段进水多级 AO 工艺,多级 AO 工艺通常是由 3~5 组缺氧池、好氧池串联组成,进水按一定比例分配到缺氧池,为反硝化补充碳源,实现对进水中有机物的最大化利用;污泥回流到首端,形成工艺各段污泥浓度呈由高到低梯度分布,创造了适合硝化菌及反硝化菌的生长环境,大大提高了脱氮能力。学者们^[8-9]对多级 AO 工艺中的段数选取计算、进水 C/N 分配、AO 容积比、流量分配比、水力停留时间(HRT)、污泥回流比、微生物种类、悬浮填料投加等方面进行深入的研究,并在市政污水厂进行了推广应用,取得了一定的效果。

多级 AO-膜生物反应器(MBR)工艺是多级 AO 工艺与 MBR 工艺相结合形成的一种新型的污水处理工艺^[10-11],该工艺利用膜的高效截留作用进行泥水分离,实现了 HRT 和 SRT 的完全分离,通过将 MBR 池高污泥浓度的混合液回流至前端生物池,保持整个生化系统的高活性污泥浓度,提升系统对污

染物的去除效率。多级 AO-MBR 工艺在应用过程中发现存在一些不足,MBR 池回流混合液携带溶解氧(DO)质量浓度高,直接回流到首端缺氧池会破坏缺氧环境影响反硝化效果^[10]。为了提升多级 AO-MBR 工艺脱氮效果,在学者研究的基础上开发出了—种改良多级 AO-MBR 工艺,通过在缺氧池前端增加消氧池,含高 DO 的混合液首先回流到消氧池,在此将混合液中的 DO 充分消耗和利用,以降低 DO 影响后续缺氧反硝化效果。研究该工艺好氧区 DO 质量浓度调整和缺氧区不同进水分配比变化对系统脱氮除碳效率的影响,探索适合改良多级 AO-MBR 工艺的适宜运行参数,为“双碳”目标下的新工艺推广应用提供基础资料^[12-13]。

1 材料与方法

1.1 试验装置

改良多级 AO-MBR 中试试验装置采用集装箱形式,池体采用 6 mm 厚碳钢板焊接而成,池体分隔为:消氧池、缺氧池 1、好氧池 1、缺氧池 2、好氧池 2、缺氧池 3、好氧池 3、缺氧池 4、MBR 池。试验装置尺寸为长×宽×高=5.5 m×2.0 m×2.8 m,有效水深为 2 m,有效容积为 22 m³,其中消氧池、缺氧池 1、好氧池 1、缺氧池 2、好氧池 2、缺氧池 3、好氧池 3、缺氧池 4、MBR 池各池有效容积分别为 2、2、3、2、3、2、3、2、3 m³。改良多级 AO-MBR 工艺流程如图 1 所示。通过在前端增加消氧池对多级 AO-MBR 工艺进行改良,采用四级 AO 工艺,最后一级好氧池由 MBR 池替代,采用 4 段配水,每个缺氧池进水端均设电磁流量计和调节阀门,用于调整进水流量;消氧池和缺氧池安装搅拌机;好氧池安装曝气管路和微孔曝气盘;膜组件采用穿孔曝气管曝气;曝气设备选用罗茨鼓风机,风量为 1.5 m³/min,风压为 3 m,功率为 2.2 kW,曝气支管设调节阀门、流量计,风机采用变频控制,通过变频设置调节风量;膜产水泵采用自吸泵,流量为 3 m³/h,扬程为 10 m,功率为

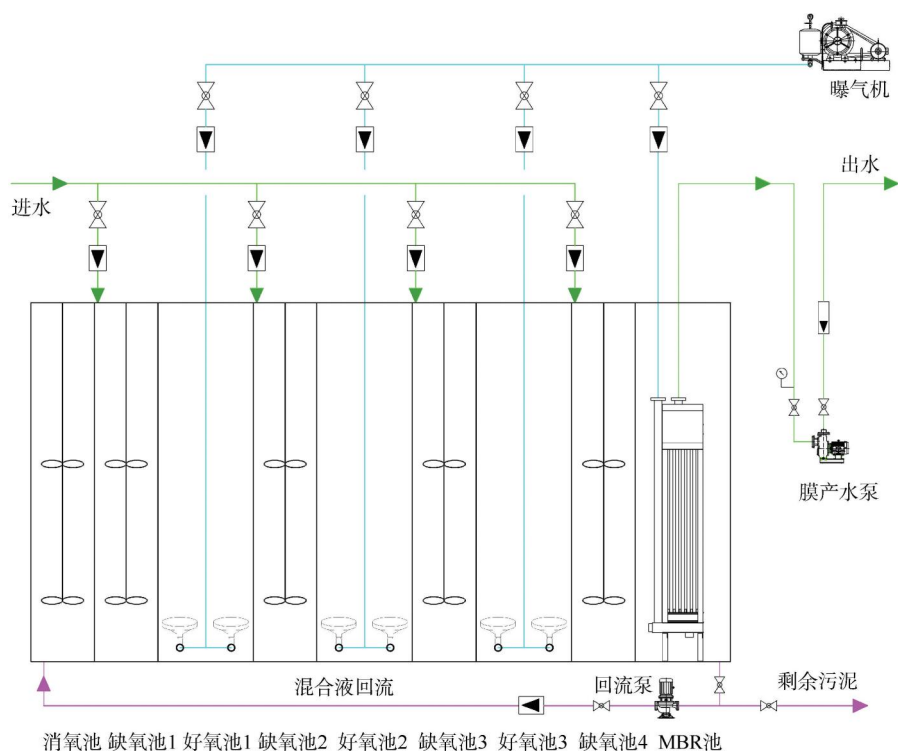


图1 改良多级AO-MBR工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Improved Multistage AO-MBR

0.55 kW;混合液回流泵采用管道式离心泵,流量为 $8\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为6 m,功率为0.75 kW,配套可编程逻辑控制器(PLC)和在线监测仪表系统。

中试试验膜组件选用帘式中空纤维膜,膜面积为 120 m^2 ,设计处理水量为 $48\text{ m}^3/\text{d}$,膜通量为 $16.7\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,膜孔径为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,膜组件曝气量为 $1\text{ m}^3/\text{min}$ 。

1.2 检测方法

水质指标按照国标《水和废水分析监测方法》(第4版)对应测定方法。

(1)pH值采用《水质 pH值的测定 电极法》(HJ 1147—2020);

(2)COD采用《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017);

(3)氨氮采用《水质 氨氮的测定 流动注射-水杨酸分光光度法》(HJ 666—2013);

(4)总氮采用《水质 总氮的测定 连续流动-盐酸萘乙二胺分光光度法》(HJ 667—2013);

(5)悬浮物采用《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB/T 11901—1989);

(6)水温采用《水质 水温的测定-温度计或颠

倒温度计测定法》(GB/T 13195—1991);

(7)DO采用哈希便携式溶氧仪LDO™进行测定;

(8)混合液悬浮固体(MLSS)含量采用《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901—1989)。

1.3 试验用水

中试装置位于北京市通州区某村污水站内,试验污水取自污水站调节池,试验用水属于典型的农村生活污水。试验期间,检测进水COD质量浓度为 $140.0\sim 410.0\text{ mg/L}$, BOD_5 质量浓度为 $100.0\sim 260.0\text{ mg/L}$,氨氮质量浓度为 $19.0\sim 50.0\text{ mg/L}$,总氮质量浓度为 $33.0\sim 66.0\text{ mg/L}$,悬浮物质量浓度为 $30.0\sim 80.0\text{ mg/L}$,pH值为7~9、水温为 $18\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.4 试验方法

前期通过投加活性污泥进行系统调试,调试出水达标后,开始连续运行,产水平均流量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$,消氧池HRT为1 h,缺氧池1、缺氧池2、缺氧池3、缺氧池4各池HRT均为1 h,缺氧段总HRT为4 h。好氧池1、好氧池2、好氧池3、MBR池各池HRT均为1.5 h,好氧段总停留时间为6 h。膜池混合液回流比取300%。

试验 1: 缺氧池进水流量分配比为 30% : 25% : 25% : 20%, 通过曝气量的调整控制好氧池 1、好氧池 2、好氧池 3 的 DO 质量浓度为 2.5~3.0、2.0~2.5、1.5~2.0、1.0~1.5、0.5~1.0 mg/L, 对比好氧池在不同 DO 质量浓度下工艺对 COD、氨氮和总氮的去除效果。每个工况持续运行 20 d, 取样周期为每天上午、下午各取 1 次样, 测定进水和出水水质数据, 试验周期为 100 d。

试验 2: 根据 DO 试验结果, 控制好氧池 DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L, 膜池混合液回流比为 300%。进行不同进水流量分配比试验, 通过调整缺氧池 1 : 缺氧池 2 : 缺氧池 3 : 缺氧池 4 进水比例以下为 4 种工况, 工况 1 为 25% : 25% : 25% : 25% ;

工况 2 为 20% : 25% : 25% : 30% ; 工况 3 为 30% : 30% : 30% : 10% ; 工况 4 为 40% : 30% : 20% : 10%。通过调整缺氧池进水分配比, 分析工艺对污染物的去除效果变化情况。每种工况下连续测定 25 d 的进出水水质数据, 试验周期为 100 d。

2 结果与讨论

2.1 不同 DO 质量浓度对污染物去除效果

2.1.1 不同 DO 质量浓度对 COD 去除效果

在中试试验期间, 检测进水 COD 质量浓度为 150.0~410.0 mg/L, 进水 COD 波动幅度大, 通过调整改良多级 AO-MBR 工艺好氧池 1、好氧池 2、好氧池 3 曝气量, 控制 3 个好氧池在不同 DO 质量浓度条件下检测工艺对 COD 的去除效果, 试验结果如图 2 所示。

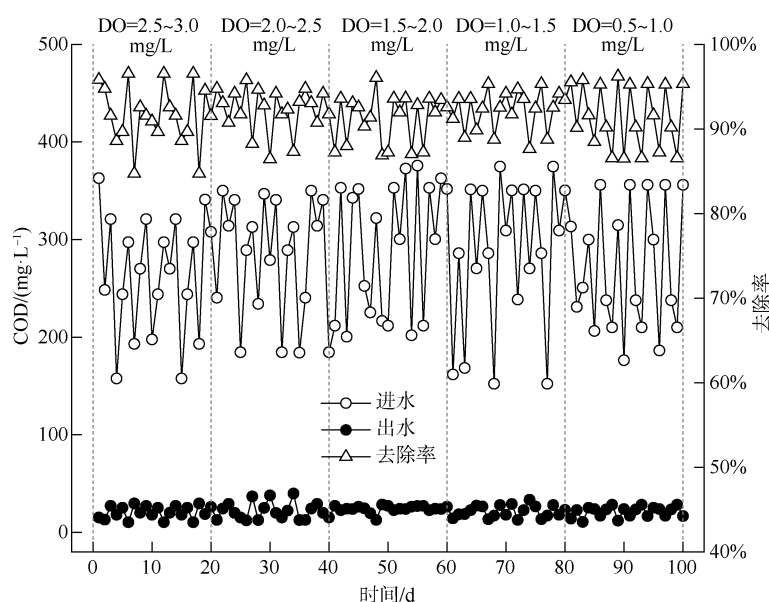


图 2 不同 DO 质量浓度对 COD 去除效果

Fig. 2 Effect of Different DO Mass Concentrations on COD Removal

由图 2 可知, 好氧池 DO 质量浓度为 2.5~3.0 mg/L 时, 工艺对 COD 去除率为 91.6%, 出水 COD 平均质量浓度为 20.7 mg/L; DO 质量浓度为 2.0~2.5 mg/L 时, COD 平均去除率为 92.3%; DO 质量浓度为 1.5~2.0 mg/L 时, COD 平均去除率为 91.2%; DO 质量浓度为 1.0~1.5 mg/L 时, COD 平均去除率为 92.2%; DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L 时, COD 平均去除率为 91.5%。随着 DO 质量浓度的降低, 工艺对 COD 去除率无明显变化趋势, 表明好氧池 DO 在 0.5~3.0 mg/L 的条件下, 工艺对 COD 的去除率均维持在较高水平。

试验期间调整好氧池 DO 质量浓度, 工艺对

COD 的去除率依然保持较高水平, 分析原因如下: 好氧池保持低 DO 条件下有利于好氧区发生同步硝化反硝化反应, 对污水中的有机物降解充分^[7]; 多级 AO 工艺系统内活性污泥浓度依次递减, 前段污泥浓度高, 生化池平均污泥质量浓度达到 8 000 mg/L 以上, 平均污泥浓度高于传统 AAO-MBR 工艺 10%~20%, 高微生物量对有机物的去除更彻底; 采用多级缺氧好氧交替方式运行, 使微生物在缺氧、好氧环境交替状态, 加速了碳源的利用^[8]; MBR 的高效截留作用, 提高了系统固液分离能力, 使系统微生物量大幅度增加, 同时, 膜对相对分子质量为 100 ku 以上的大分子有机物能完全截留,

可提高对大分子难降解有机物的去除能力^[9],对有机物的综合去除效率更好。

2.1.2 不同 DO 浓度对氨氮去除效果

试验进水氨氮质量浓度为 18.0~50.0 mg/L,工艺在不同 DO 条件下去除氨氮情况如图 3 所示。好氧池 DO 质量浓度为 2.5~3.0 mg/L 时,氨氮平均去除率为 96.7%;DO 质量浓度为 2.0~2.5 mg/L 时,氨

氮平均去除率为 97.6%;DO 降低到 1.5~2.0 mg/L 时,氨氮平均去除率为 97.0%;DO 质量浓度为 1.0~1.5 mg/L 时,氨氮平均去除率为 97.3%;DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L 时,氨氮平均去除率为 96.5%。随着好氧池 DO 质量浓度的变化,工艺对氨氮去除率无明显差异,出水氨氮平均质量浓度为 1.0 mg/L,系统对氨氮去除率均处于较高水平。

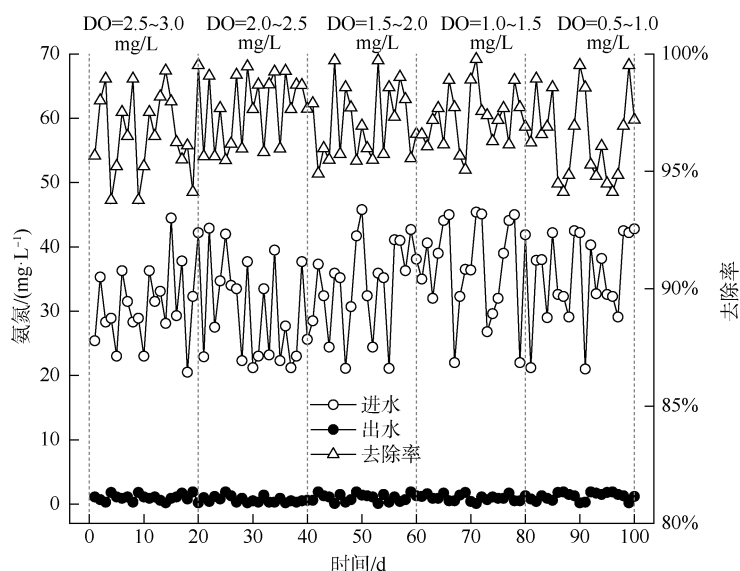


图 3 不同 DO 浓度对氨氮去除效果

Fig. 3 Effect of Different DO Concentration on Ammonia Nitrogen Removal

随着好氧池 DO 质量浓度的逐渐降低,系统对氨氮的去除率仍保持较高的水平,因污水中的可降解性 COD 作为反硝化的碳源大部分被利用,使得进入好氧区的 COD 浓度极低,好氧区单位时间内进入生化系统的有机物与活性污泥质量的比值污泥负荷(F/M)低,避免了活性污泥中占优势的异养菌利用有机物进行合成代谢并大量消耗 DO 质量,导致微生物的耗氧速率大大降低,故在较低的 DO 质量浓度下也能取得较好的硝化效果^[7,10];尽管好氧池 1、好氧池 2、好氧池 3 段 DO 质量浓度均较低,MBR 池 DO 浓度依然保持在较高水平,MBR 池的高 DO 质量浓度也强化了系统对氨氮的整体去除效率;氨氮的去除主要依靠好氧区的硝化作用,多级 AO-MBR 工艺中,污染物在 3 个好氧池和 MBR 池反复进行硝化作用,使得硝化效率更高;由于膜的高效截留作用,MBR 池污泥质量浓度高达 10 000 mg/L,300%膜池混合液回到消氧池,生物池内从前到后形成由高到低再到高的污泥浓度梯度,生化系统平均污泥

质量浓度高达 8 000 mg/L,生物池内硝化菌的比增殖速度加快,使得生长缓慢的硝化细菌得以富集^[11],强化了系统对氨氮的去除效率。

2.1.3 不同 DO 质量浓度对总氮去除效果

研究工艺在不同 DO 质量浓度下对总氮的去除效果(图 4),试验期间进水总氮质量浓度为 33.0~66.0 mg/L,出水总氮质量浓度为 2.0~11.0 mg/L。在 DO 质量浓度为 2.5~3.0 mg/L 时,总氮平均去除率为 85.1%;DO 质量浓度为 2.0~2.5 mg/L 时,总氮平均去除率为 86.6%;DO 质量浓度为 1.5~2.0 mg/L 时,总氮平均去除率增加到 88.2%;继续降低 DO 质量浓度至 1.0~1.5 mg/L 时,总氮平均去除率增加到 89.1%;DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L 时,总氮平均去除率提高到 90.4%,随着 DO 质量浓度的逐步降低,工艺对总氮的去除效率持续增加。

传统 AAO 工艺中,总氮去除率与进水 C/N 相关,且受硝化液回流比限制,因而总氮去除率受限。多级 AO 工艺通过分段进水,将进水有机物分配到

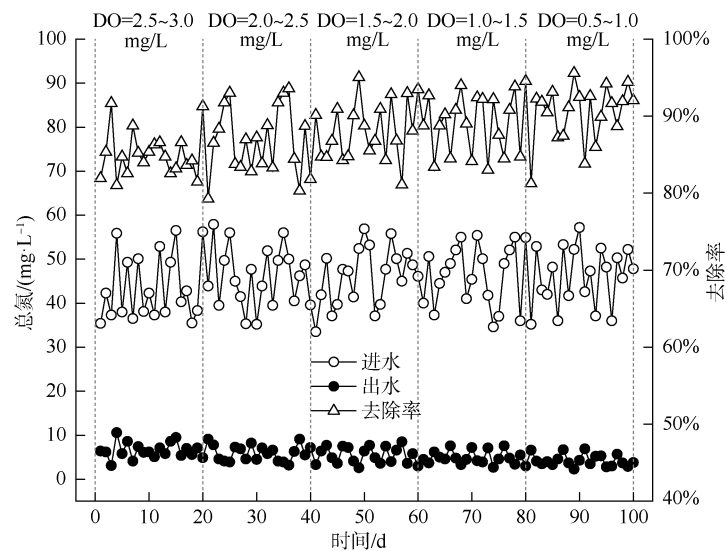


图4 不同 DO 浓度对总氮去除效果

Fig. 4 Effect of Different DO Concentration on Total Nitrogen Removal

缺氧池作为反硝化碳源利用,无需硝化液回流,脱氮效果优于传统 AAO 工艺^[11]。在改良多级 AO-MBR 工艺中,好氧段产生的硝态氮(NO_3^- -N)进入后续缺氧段进行反硝化脱氮,多点进水避免了碳源不足带来的碳源争夺的问题,经过多级缺氧、好氧的交替处理,提高工艺对总氮的去除效果^[12]。

随着好氧区 DO 质量浓度的降低,工艺对总氮的去除效率逐渐提升,主要原因如下:在较低的 DO 时,好氧区发生了同步硝化反硝化反应,提高了工艺脱氮效率;好氧区携带低 DO 质量浓度进入缺氧区,保持了缺氧区良好的厌氧环境,有利于反硝化脱氮反应的进行^[7,13];由于好氧区曝气量较小,对好氧区的扰动作用变小,活性污泥易于形成较大的污泥絮体,更利于同步硝化反硝化反应的发生^[7];由于采用 4 段进水,生物池中前一级好氧区进行硝化反应较为彻底,产生的 NO_3^- -N 与进水中的有机碳源进入下一级缺氧区进行反硝化反应,反硝化效率高;MBR 池的硝化液通过 300% 的高回流比, NO_3^- -N 大部分回流到消氧池,再进入缺氧池 1 池进行反硝化脱氮得以去除。

2.2 不同进水分配比对污染物去除效果

2.2.1 不同进水分配比对 COD 去除效果

试验期间好氧池 DO 质量浓度控制在 0.5~1.0 mg/L,进水 COD 平均质量浓度为 281.8 mg/L,进水 COD 质量浓度最低为 144.6 mg/L,最高为 404.0 mg/L(图 5),进水 COD 的变化幅度较大;通过调整

缺氧池 1:缺氧池 2:缺氧池 3:缺氧池 4 进水比例为以下 4 种工况,工况 1 为 25%:25%:25%:25%;工况 2 为 20%:25%:25%:30%;工况 3 为 30%:30%:30%:10%;工况 4 为 40%:30%:20%:10%,在缺氧池 1:缺氧池 2:缺氧池 3:缺氧池 4 进水分配比为 25%:25%:25%:25%时,COD 平均去除率为 92.2%;进水分配比为 20%:25%:25%:30%时,COD 平均去除率为 92.2%;进水分配比为 30%:30%:30%:10%时,COD 平均去除率为 92.5%;进水分配比为 40%:30%:20%:10%时,COD 平均去除率为 92.5%。

虽然进水分配比不同,但工艺对 COD 的去除率均保持在 92.0%以上,出水 COD 稳定在 35.0 mg/L 以下,不同进水分配比未对 COD 的去除率造成较大影响。主要是由于改良多级 AO-MBR 工艺中活性污泥浓度沿池长递减最后递增,平均污泥浓度高于常规 AAO-MBR 工艺,提高了系统抗冲击负荷能力,多级 AO 工艺对 COD、氨氮、总氮的去除率较高^[14];多级 AO 工艺在 4 段缺氧池均设置了配水点位,配水点位设置的越多,碳源的利用率越高,工艺的处理效果更好^[15-16];进水按一定的比例分配进入各个缺氧池,反应器系统在缺氧段发生反硝化反应,进水中的大部分 COD 在缺氧池发生反硝化反应被消耗,配水分配比的变化未对系统去除 COD 造成影响^[17];进水中的 COD 大部分被反硝化作为碳源所利用,少部分 COD 进入后续好氧池被好氧微生物进一步降

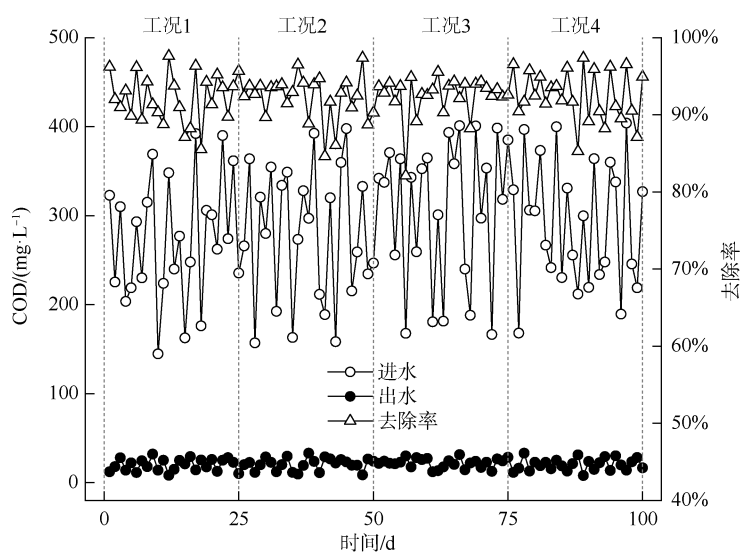


图5 不同进水分配比对 COD 去除效果

Fig. 5 Effect of Different Influent Distribution Ratios on COD Removal

解去除^[18]。

2.2.2 不同进水分配比对氨氮去除效果

在中试试验期间,检测进水氨氮质量浓度为 18.0~50.0 mg/L(图 6),进水分配比为 25% : 25% : 25% : 25%时,氨氮平均去除率为 96.8%;进水分配比为 20% : 25% : 25% : 30%时,氨氮平均去除率为 97.5%;进水分配比为 30% : 30% : 30% : 10%时,氨氮平均去除率为 96.9%;进水分配比为 40% : 30% : 20% : 10%时,氨氮平均去除率为 97.0%。随着进水分配比的变化,出水氨氮平均质

量浓度为 1.0 mg/L,不同进水分配比对氨氮的去除率无明显影响。

工艺对氨氮的去除率一直维持在较高水平,原因如下:改良多级 AO-MBR 工艺生物池内平均污泥浓度高,多点配水使得各级池内有机物分布均匀;MBR 工艺系统 SRT 较长,硝化效果较好;各级缺氧区反硝化出水流入后续好氧区,为硝化作用补充了碱度,有利于硝化反应的进行;同时,膜池的高 DO 质量浓度为微生物对氨氮的去除提供了强有力的保障^[8];进水流量分配比作用的主要场所是缺氧反硝

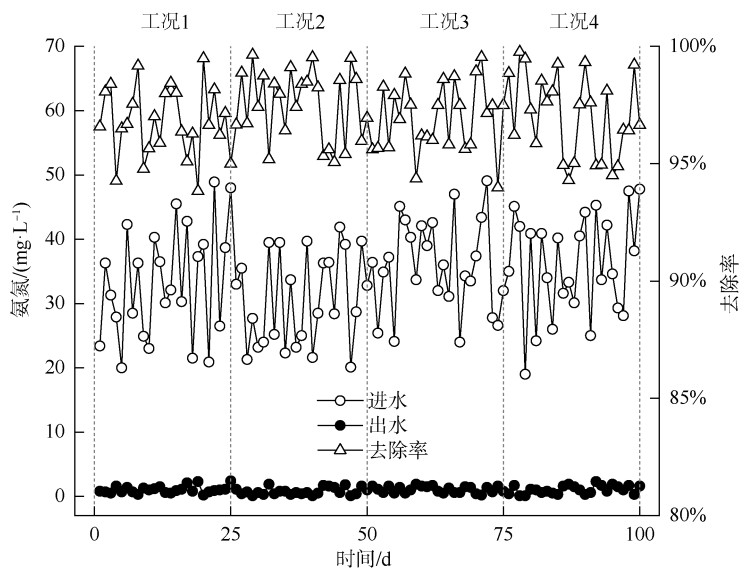


图6 不同进水分配比对氨氮去除效果

Fig. 6 Effect of Different Influent Distribution Ratios on Ammonia Nitrogen Removal

化单元,氨氮的去除主要是由好氧池中的硝化作用决定的,进水分配比的变化对氨氮转化的好氧和 MBR 单元几乎无影响^[19];多级 AO 工艺系统中,连续的好氧池和 MBR 池反复进行硝化反应,使得硝化反应更为彻底^[20]。

2.2.3 不同进水分分配比对总氮去除效果

试验期间进水总氮质量浓度为 19.0~53.0 mg/L (图 7),随着进水分配比的变化,系统对总氮的去除率随之波动;进水分配比为 25% : 25% : 25% : 25% 时,总氮平均去除率为 91.1%;进水分配比为

20% : 25% : 25% : 30% 时,总氮平均去除率为 89.8%;进水分配比为 30% : 30% : 30% : 10% 时,总氮平均去除率为 86.9%;进水分配比为 40% : 30% : 20% : 10% 时,总氮平均去除率为 83.6%。随着流量分配比的变化工艺对总氮的去除率出现波动,4 级缺氧池进水流量差异较大时,总氮去除率低。进水流量分配比为 25% : 25% : 25% : 25% 时,总氮平均去除率为 91.1%,此时的脱氮效果最好,由于碳源分配较为均匀,各段缺氧碳源充足因而脱氮效率较高。

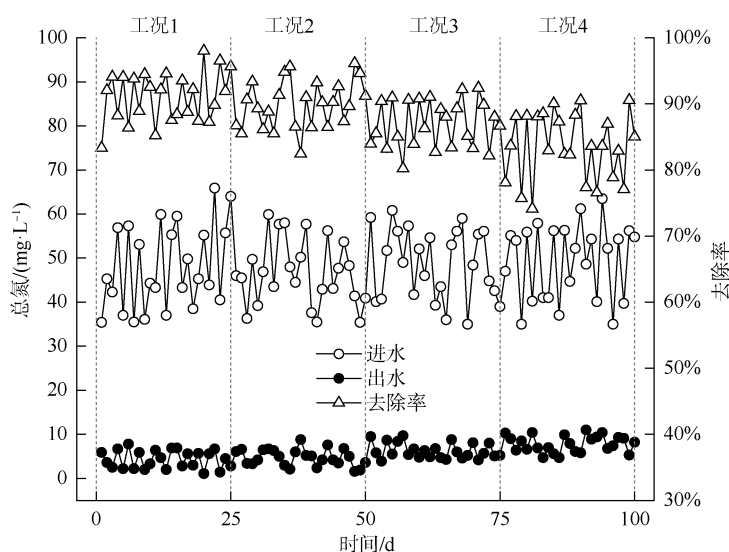


图 7 不同进水分分配比对总氮去除效果

Fig. 7 Effect of Different Influent Distribution Ratios on Total Nitrogen Removal

试验期间,好氧池 DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L,在不同进水分分配比情况下出水总氮都稳定低于 12.0 mg/L,主要是因为低 DO 条件下,好氧区发生同步硝化反硝化反应对总氮有部分去除作用;同时,好氧区 DO 的降低也有利于后续缺氧池保持厌氧环境,强化了缺氧段的内源反硝化作用;碳源在平均分配条件下,C/N 处于较为合适的条件,各段缺氧池的反硝化效果均处于较高水平,整体脱氮效率最高;MBR 池 300% 的混合液回流提高了系统对总氮去除效率,尤其是末端进水中剩余总氮通过回流到前端大部分得以去除;前置消氧池的增加避免高 DO 对缺氧池 1 厌氧环境的破坏,提高了缺氧池 1 的反硝化脱氮效果^[21];多级 AO 工艺与 MBR 结合,硝化菌得以富集,良好的硝化效果提升系统反硝化去除总氮的能力,总氮去除效率明显高于传统工艺^[22]。

3 结论

采用改良多级 AO-MBR 工艺对农村生活污水进行中试研究,研究适宜该工艺运行的好氧池 DO 质量浓度条件和最佳缺氧池碳源分配比参数,主要结论如下。

(1) 通过在前端新增消氧池,开发出一种改良多级 AO-MBR 工艺,用于农村生活污水中试研究,取得了良好的效果。

(2) 保持缺氧池进水流量分配比为 30% : 25% : 25% : 20% 时,随着好氧池 DO 质量浓度的降低,工艺对总氮的去除效率逐步提升,DO 最佳质量浓度为 0.5~1.0 mg/L,此时工艺对总氮的去除效率最佳,工艺对 COD、氨氮和总氮的去除效率均处于较高水平。

(3) 维持好氧池 DO 质量浓度为 0.5~1.0 mg/L 时,缺氧池进水流量分配比的变化明显影响总氮的

去除效果,对 COD 和氨氮的去除率影响较小,在进水流量分配比为 25% : 25% : 25% : 25% 时,工艺对总氮去除率最高,此时工艺对 COD、氨氮和总氮的平均去除率分别为 92.2%、96.7% 和 91.1%。

(4) 改良多级 AO-MBR 工艺对污染物的去除率高,无需投加碳源,出水总氮能稳定在 10.0 mg/L 以下,由于好氧池低 DO 节约部分曝气能耗,同时无需硝化液回流节约电耗,该工艺在高排放标准污水处理中节能减排效果显著,具有较好的应用前景。

(5) 改良多级 AO-MBR 工艺进水分配比不同工程存在差异,进水分配比与进水水质、C/N、水温等因素有关,不同的工程进水分配比需根据进水水质数据计算或现场试验确定。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 施春红,江嘉诚,张玉琦,等. MBR 处理农村生活污水及膜污染控制研究进展[J]. 水处理技术, 2024, 50(2): 20-25.
SHI C H, JIANG J C, ZHANG Y Q, et al. Research progress of MBR treatment of rural domestic sewage and membrane pollution control[J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(2): 20-25.
- [3] 鲍任兵,徐健,张云志,等. 多级 AO 工艺短程硝化反硝化的启动与运行调控[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 95-103.
BAO R B, XU J, ZHANG Y Z, et al. Start-up and operation regulation of shortcut nitrification-denitrification in multi-stage AO processes [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(9): 95-103.
- [4] 叶红玉,冯洪波,姚轶,等. 浙江省农村生活污水处理设施排入和排放标准简议[J]. 中国给水排水, 2023, 39(2): 7-11.
YE H Y, FENG H B, YAO Y, et al. Explanation on discharge standards of rural domestic sewage treatment facilities in Zhejiang province[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(2): 7-11.
- [5] 刘增军,张开海,孙序营,等. 多级 AO 用于高排放标准下低碳高氮生活污水处理[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2): 55-59.
LIU Z J, ZHANG K H, SUN X Y, et al. Application of multi-stage AO in the treatment of low carbon and high nitrogen domestic sewage with high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2): 55-59.
- [6] 杨巍,宋世琨,郑佳勇,等. 多级 A/O 工艺在污水处理厂提标升级改造中的应用[J]. 水处理技术, 2023, 49(3): 134-138.
YANG W, SONG S K, ZHENG J Y, et al. Application of multistage A/O process in upgrading of wastewater treatment plant[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(3): 134-138.
- [7] 王拓,严冰. 多级 A/O 工艺协同精确控制系统用于低 C/N 进水污水厂[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 65-69.
WANG T, YAN B. Application of multi-stage A/O process collaborative precise control system in wastewater treatment plant with low C/N influent [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 65-69.
- [8] 侯子洸,周鑫, Koubode Rudy Alain Ronel, 等. 分段进水多级 A/O 工艺研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(6): 7-13.
HOU Z L, ZHOU X, RONEL K R A, et al. Research progress on the step-feed multi-stage A/O process [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(6): 7-13.
- [9] 吴明明,周毅,熊珍,等. 某地下污水厂 MBR 膜运行效率及工艺控制分析[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 176-181.
WU M M, ZHOU Y, XIONG Z, et al. Analysis of operation efficiency and process control of MBR membrane for an underground WWTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 176-181.
- [10] 鲍任兵,徐健,陈鹏,等. 优化污泥回流方式对多级 AO-MBR 工艺的影响[J]. 净水技术, 2024, 43(3): 92-98, 142.
BAO R B, XU J, CHEN P, et al. Influence of optimized sludge reflux mode on multilevel AO-MBR process [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3): 92-98, 142.
- [11] 姚亮,张强,李鹏. 多级 AO+MBR 工艺在污水处理厂高排放标准提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 164-173.
YAO L, ZHANG Q, LI P. Application of multistage AO+MBR processes in upgrading and reconstruction of stricter discharge standard of WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 164-173.
- [12] 贾建伟,党晓宏,李建洋,等. AMAO(多级 AO)工艺在污水厂扩建工程中的应用及运行[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 63-66.
JIA J W, DANG X H, LI J Y, et al. Application and operation of AMAO technology (multi-stage AO) for expansion project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 63-66.
- [13] 俞开昌. MBR-NF 双膜法高品质再生水制备技术与工程应用 [D]. 北京:清华大学, 2017.
YU K C. MBR-NF hybrid system and its engineering application for high-quality reclaimed water production [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

(下转第 179 页)

- [4] 吕红亮, 熊林, 周霞, 等. 面向过程管控的海绵城市平台设计思路[J]. 中国给水排水, 2019, 35(16): 1-8.
LÜ H L, XIONG L, ZHOU X, et al. Design ideas of sponge city platform oriented to process management and control[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(16): 1-8.
- [5] 郑涛, 唐志芳, 张敏, 等. 基于监测及排水模型的海绵城市小区建设效果评估[J]. 中国给水排水, 2022, 38(9): 118-122.
ZHENG T, TANG Z F, ZHANG M, et al. Assessment of community reconstruction performance during sponge city construction based on online monitoring and drainage model[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(9): 118-122.
- [6] 王旭阳, 耿适为, 王冬, 等. 海绵城市理念下市政道路排水设计及关键问题探讨[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 569-573.
WANG X Y, GENG S W, WANG D, et al. The discussion of municipal road drainage design and key issues under sponge city concept[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 569-573.
- [7] 吕红亮, 吴岩杰, 于德森, 等. 后试点时代的已建区海绵城市建设方案编制[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6): 41-48.
LÜ H L, WU Y J, YU D M, et al. Thoughts on the construction plan of sponge city in the built-up area in the post pilot era[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(6): 41-48.
- [8] 范树合. 构筑绿色生态屏障推进城市高质量发展——对天津绿色生态屏障五年建设实践的思考[J]. 求知, 2022(10): 56-58.
FAN S H. Building a green ecological barrier to promote high-quality urban development: Thoughts on the five-year practice of green ecological barrier construction in Tianjin [J]. Seeking Knowledge, 2022(10): 56-58.
- (上接第 123 页)
- [14] 徐颂, 王雯榕, 陈晓娟. 多级 A/O 深度处理城镇低生化性污水脱氮除磷探究[J]. 水处理技术, 2021, 47(9): 116-120.
XU S, WANG W R, CHEN X J. Study on the nitrogen and phosphorus removal of municipal low-biochemical sewage by multi-stage A/O process[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(9): 116-120.
- [15] 王延萍. Bardenpho 工艺与多级 AO 工艺对比分析[J]. 天津建设科技, 2019, 29(6): 41-43.
WANG Y P. Comparative analysis of Bardenpho process and multistage AO process [J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2019, 29(6): 41-43.
- [16] 许忠凤, 戴海平, 孙磊, 等. 多级 A/O-MBR 工艺对生活污水脱氮除磷的工艺研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(11): 117-126.
XU Z F, DAI H P, SUN L, et al. Study on multistage A/O-MBR process for nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(11): 117-126.
- [17] 郑凯, 张子贤, 吴勇, 等. 改良型多级 A/O-MBR 组合工艺对低 C/N 比生活污水的强化除磷[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1675-1680.
ZHENG K, ZHANG Z X, WU Y, et al. Improved multi-stage A/O-MBR combination process for removal of phosphorus of low C/N ratio domestic sewage [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3): 1675-1680.
- [18] 吕利平, 李航, 张欣, 等. 多点进水对前置预缺氧 A²/O 工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 8-13.
LÜ L P, LI H, ZHANG X, et al. Effect of step-feed on nitrogen and phosphorus removal of pre-anoxic A²/O process[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 8-13.
- [19] 张浩. 新型多级 AO-MBR 工艺对市政污水处理的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
ZHANG H. Study on the treatment of municipal wastewater by new multistage AO-MBR process [D]. Tianjin: Tiangong University, 2019.
- [20] 高术波. 全地下再生水厂多级 AO+MBR 工艺设计要点工艺设计要点、难点及创新点分析[J]. 水处理技术, 2022, 48(8): 144-150.
GAO S B. Design essentials, difficulties and innovations of the full underground reclaimed water plant using multistage AO + MBR process [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(8): 144-150.
- [21] 李一龙, 包宇, 邸文正, 等. 高排放标准下分段进水多级 AO+MBR 工艺的设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(4): 76-81.
LI Y L, BAO Y, DI W Z, et al. Design of step-feed multi-stage AO + MBR process under high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(4): 76-81.
- [22] 王启槟, 李浩, 董旭, 等. 改良型 A²/O 污水处理厂的工艺优化调控方案及其对同步脱氮除磷效率的提升[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 659-665.
WANG Q B, LI H, DONG X, et al. Process optimization regulation scheme of a full-scale modified A²/O wastewater treatment plant and its improvement of simultaneous nitrogen and phosphorus removal efficiency [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 659-665.