

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.013

# 一体化多级AO生物膜反应器处理农村污水研究

韦怀德<sup>1</sup>, 李发站<sup>2</sup>, 谷超<sup>3</sup>

(1. 中州水务控股有限公司, 河南 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学 环境与市政工程学院, 河南 郑州 450046; 3. 郑州市交通规划勘察设计院, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 随着对农村污水治理的重视程度越来越高,农村污水处理设施需求量也在不断增加。为此,分析了一体化多级AO生物膜反应器处理分散式农村生活污水的效果,探讨了反应器的可行性及沿程处理效果。结果表明,在平均水温为15~28℃、硝化液回流比为100%、水力停留时间为10 h的运行条件下,该反应器出水COD、氨氮、总氮的平均浓度分别为30、5.74、31.55 mg/L,出水COD和氨氮浓度满足河南省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 41/1820—2019)一级排放标准,反应器抗COD、氨氮冲击负荷性能较好。并且该一体化污水处理装置运行费用低廉,约为0.30元/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 农村污水; 一体化反应器; 多级AO生物膜; 生物脱氮; 低能耗

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0081-07

## Integrated Multistage AO Biofilm Reactor for Treatment of Rural Sewage

WEI Huai-de<sup>1</sup>, LI Fa-zhan<sup>2</sup>, GU Chao<sup>3</sup>

(1. Zhongzhou Water Holding Co. Ltd., Zhengzhou 450046, China; 2. School of Environment and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Zhengzhou Transportation Planning Survey and Design Institute, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** The increasing importance of rural sewage treatment increases the demand for rural sewage treatment facilities. This paper analyzed the performance of integrated multistage AO biofilm reactor for the treatment of decentralized rural domestic sewage, discussed the feasibility of the reactor, and investigated the treatment efficiency along the process. When the average water temperature was 15–28 °C, the reflux ratio of nitrification liquid was 100% and the hydraulic residence time was 10 h, COD, ammonia nitrogen and total nitrogen concentrations of effluent were 30 mg/L, 5.74 mg/L, 31.55 mg/L, respectively. The effluent COD and ammonia nitrogen met the first level limits specified in the local standard of Henan Province: *Discharge Standard of Water Pollutants for Rural Sewage Treatment Facilities* (DB 41/1820–2019), and the reactor showed good impact load resistance to COD and ammonia nitrogen. In addition, the integrated sewage treatment device had a low operating cost of approximately 0.30 yuan /m<sup>3</sup>.

**Key words:** rural sewage; integrated reactor; multistage AO biofilm; biological nitrogen removal; low-energy consumption

基金项目: 河南省重大科技专项(161100310700)

通信作者: 谷超 E-mail: 1401900459@qq.com

我国农村生活污水具有水量大且污水源分散的特点,特别是对于山区农村污水难以实现集中处理<sup>[1]</sup>。现阶段大部分农村生活污水以直接外排、化粪池处理为主,生活污水处理率低,对农村附近水环境和土壤环境具有较大影响<sup>[2]</sup>。但由于农村建设资金有限、人口居住分散、管网建设难度大,导致现存污水处理技术并不适合推广使用<sup>[3]</sup>。

针对以上问题,一体化农村生活污水处理反应器应运而生,其具有基建投资费用低、占地面积小、无需专人看守、运行费用低等优点<sup>[4]</sup>。目前我国流行的一体化农村污水处理反应器主要以 $A^2O$ <sup>[5]</sup>、AO、SBR和MBR<sup>[6]</sup>为主体工艺,而以上一体化设备多用于相对集中式、规模化的农村污水处理。为解决那些无法铺设污水收集管网的山区住户和乡村住宅等污水处理难题,笔者以户为处理单位,在现有AO工艺和生物膜工艺基础上进行改良,开发了多级AO生物膜农村污水处理器,以气升泵实现充氧和污水循环流动,用以处理农村污水,以期分散式农村污水处理设备提供一种新的选择。该反应器将多级AO生物膜工艺与二沉池进行一体化设计,无需污泥回流,设施构造紧凑、合理。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 华水罐一体化反应器原理

华水罐一体化反应器由生化反应区、污泥沉淀区两部分组成,工艺流程见图1。生化反应区为外环反应池,按照比例分成4个区域形成两级AO工艺,其中好氧区有效容积为64 L,缺氧区有效容积为26 L,每个区域中均设置悬浮球生物填料;污泥沉淀区为内环反应池,底部设置污泥斗用于收集老化脱落的生物膜,有效容积为15 L。生化反应池为同心圆环结构,形成连续流两级AO生物膜工艺,同时也具有氧化沟工艺的特点,各区域功能设置合理、循环推进,以确保出水水质。

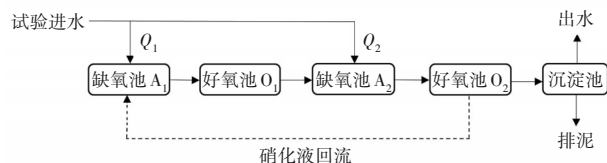
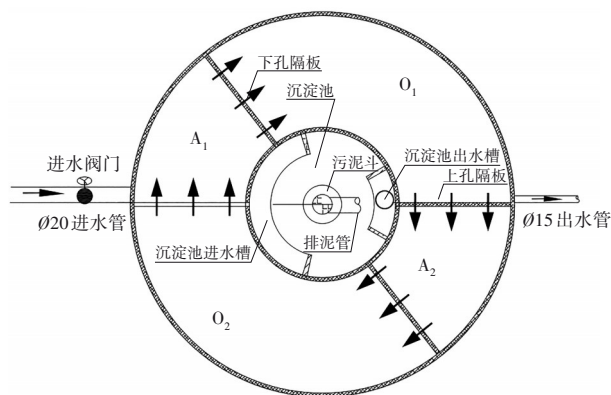


图1 一体化反应器工艺流程

Fig.1 Process flow of integrated reactor

华水罐一体化反应器的结构如图2所示。生活污水经过化粪池预处理以后,利用重力作用进入华

水罐一体化反应器,采用多点进水,分别进入一级缺氧区( $A_1$ )和二级缺氧区( $A_2$ );进入一级缺氧区( $A_1$ )的污水与前端二级好氧区( $O_2$ )流入的含有 $NO_x-N$ 的污水混合进行反硝化;一级缺氧区( $A_1$ )污水经下孔隔板利用重力作用流入一级好氧区( $O_1$ ),一级好氧区( $O_1$ )设有鼓风曝气系统,此区域完成原水剩余有机物的碳化和氨氮的硝化过程,同时通过鼓风曝气为原水提供能量(水位升高、势能增加),确保原水持续循环;一级好氧区( $O_1$ )污水经上孔隔板流入二级缺氧区( $A_2$ ),多点进水在 $A_2$ 区域进一步完成反硝化;二级缺氧区( $A_2$ )污水经下孔隔板经重力作用流入二级好氧区( $O_2$ ),此区同样设有鼓风曝气系统,主要功能为进一步完成硝化过程,提高出水水质,并且为污水增加势能,确保后续循环流动。二级好氧区( $O_2$ )污水出流分两部分,一部分经上孔隔板进入一级缺氧区( $A_1$ ),与原水充分混合后进行反硝化;另一部分经二级好氧区( $O_2$ )内侧壁开口进入沉淀区进水槽。内侧壁开口孔洞高度高于上孔隔板开口孔洞,二级好氧区( $O_2$ )出水首先通过二级好氧区( $O_2$ )和一级厌氧区( $A_1$ )中间的上孔隔板进行循环,部分经过两级AO工艺处理后的污水通过二级好氧区( $O_2$ )内侧壁开口进入沉淀池进水槽,沉淀池进水槽和出水槽中间设有挡流板,防止沉淀池出现短流现象。以上4个区域均设置生物填料,为微生物生长提供载体,即4个区域均为生物膜法。沉淀区设在华水罐的中心部位,沉淀区上部为华水罐的开孔部位,定期经人工或抽粪车排除沉淀污泥。沉淀区设有进水槽和出水槽,确保均匀进出水,提高沉淀效果。沉淀池出水流入后续人工生态处理系统中,达到除磷的目的<sup>[7]</sup>。



a. 平面图

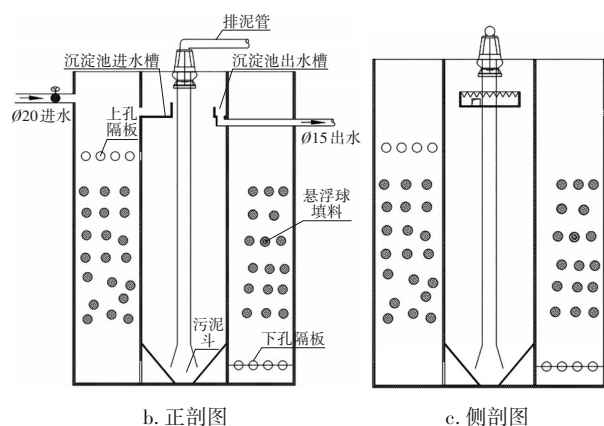


图2 华水罐一体化反应器示意

Fig.2 Schematic diagram of Huashui tank integrated reactor

华水罐一体化反应器以气升泵实现充氧和污水循环流动。好氧反应器底部充氧,液位提升,好氧池和缺氧池形成液位差,通过上孔隔板形成薄壁小孔流水现象,该液位差为反应器循环流动的动力。曝气量越大,液位差也越大,反应器循环流量就越大。因此,硝化液回流比的大小根据曝气量控制。同时,曝气量也要满足好氧池微生物生长的需求。

## 1.2 试验材料

本试验采用悬浮球生物填料,填充比为50%。填料由聚氨酯球形外壳和聚氨酯海绵块内部两部分组成。聚氨酯海绵为多孔墙体结构,比表面积 $>4\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ ,亲水性极强,吸水膨胀后密度接近于水<sup>[8]</sup>。邹海明等<sup>[9]</sup>发现,生物膜的两种挂膜方式对污水中污染物的去除效率没有影响。因此,本试验采用自然挂膜法。

## 1.3 试验水质

试验装置位于华北水利水电大学环境与市政工程学院实验楼,原水为学术交流中心的生活污水。污水通过下水道管网收集于蓄水池中,直接从蓄水池取水使用。污水水质如下:COD为100~220 mg/L,均值为162.8 mg/L;氨氮为50~60 mg/L,均值为54.5 mg/L;总氮为60~70 mg/L,均值为65.5 mg/L;pH为6.5~8.5,均值为7.5;水温为15~28℃,均值为21℃。

## 1.4 试验方法

华水罐启动阶段:启动时间为60 d(2021年5月初—6月底),进水量为180 L/d,保持稳定持续进水,硝化液回流比为100%,好氧池溶解氧控制在2~3

mg/L。每隔3 d取样一次,以检测污染物的去除情况,并观察生物膜生长情况。

反应器抗冲击负荷性能:调节进水量,改变水力停留时间(HRT),观察在8、10、12 h三种不同的HRT下华水罐一体化反应器的抗冲击负荷性能。

反应器污染物去除沿程分析:调节华水罐一体化反应器的HRT为10 h、硝化液回流比为200%、一级与二级缺氧区的流量分配比为2:1、试验水温在15℃以上,分析污染物浓度的沿程变化。

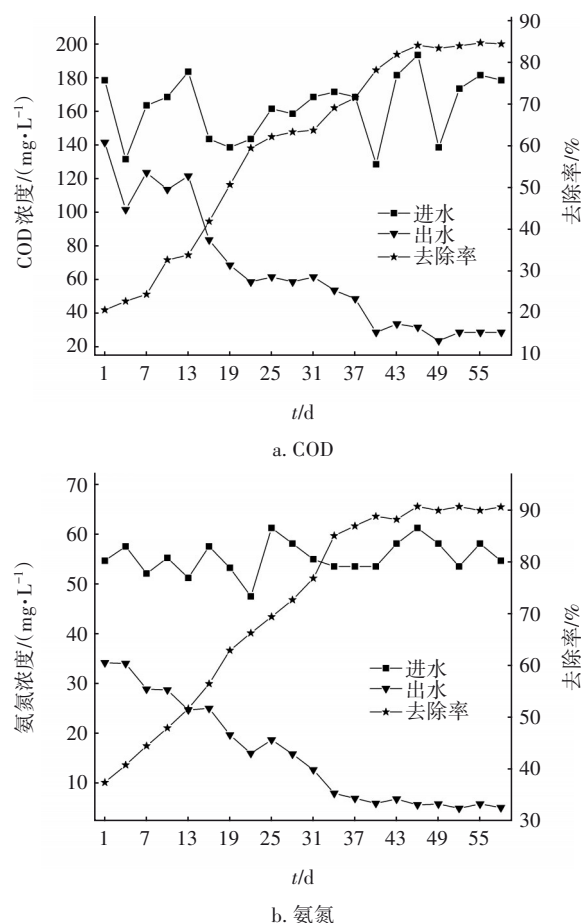
## 1.5 分析项目及方法

COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、DO、pH分别采用重铬酸钾法、纳氏试剂分光光度法、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、溶解氧仪、pH测试仪进行测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 启动阶段对污染物的去除效果

在启动阶段华水罐一体化反应器对污染物的去除效果如图3所示。其中,对COD和氨氮的去除率可分别达到84.57%、91.2%,而对总氮的去除率较低,仅为51.23%。





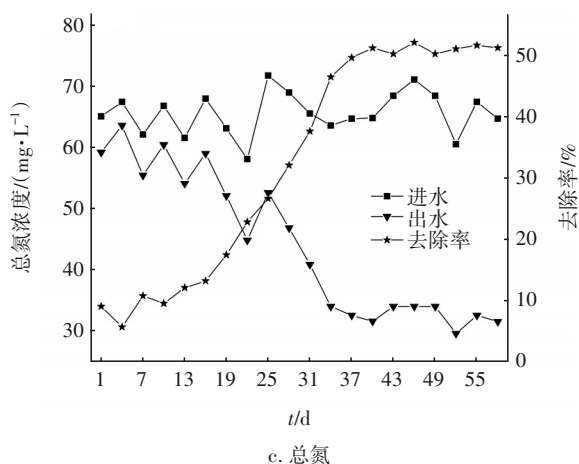


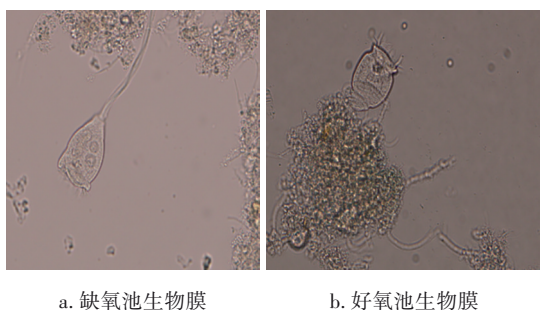
图3 启动阶段对污染物的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of pollutants in start-up phase

分析原因,一方面,由于原水的碳氮比较低,而在低碳氮比的农村生活污水处理中,对总氮的去除效果大都比较差<sup>[10-11]</sup>;另一方面,可能是由于启动阶段没有形成严格的缺氧环境,生物膜上的反硝化细菌没有形成优势菌种,缺氧池中有大量的溶解氧存在,而且缺氧区氧化还原电位偏高,导致反硝化作用较弱。

同时发现,对COD、氨氮、总氮的去除率均随着时间的延长呈增大趋势,证明反应器内悬浮球生物膜上的生物量逐渐增加。反应器在运行约45 d时趋于稳定。COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN的平均出水浓度分别为30.5、74、31.55 mg/L, COD和氨氮满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 41/1820—2019)一级排放标准,户用农村污水处理一体化反应器——华水罐启动成功,对生活污水具有良好的处理效果。

缺氧池和好氧池生物膜的镜检结果见图4。



a. 缺氧池生物膜

b. 好氧池生物膜

图4 缺氧池和好氧池生物膜的镜检结果

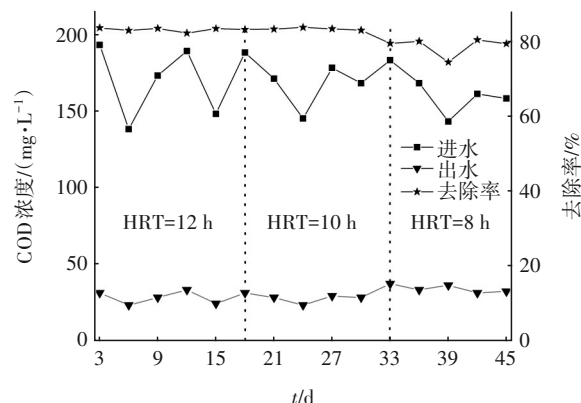
Fig.4 Microscopic examination results of biofilms in anoxic and aerobic tank

由图4可知,悬浮球生物膜上的生物相较丰富,且有少量藻类存在。由于反应器放置的地方有太

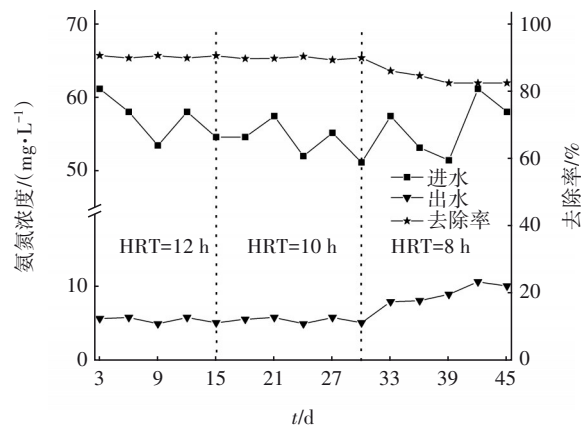
阳直射,因此会滋生藻类。在夏季太阳能直射到反应器的时候,使用黑色塑料布将其覆盖,避免反应器内绿藻泛滥影响试验结果。在缺氧和好氧段能清楚地观察到钟虫、轮虫等指示生物,说明污水经过处理后水质良好。

## 2.2 反应器抗冲击负荷性能

通过调整反应器的HRT来检验反应器抗冲击负荷的能力,根据多级AO生物膜工艺的特点及试验需求设置HRT<sup>[12]</sup>。反应器抗冲击负荷的性能见图5。由图5(a)可知,反应器对COD的去除效果较稳定,尽管进水水质存在波动,但在不同的HRT下,反应器出水COD浓度均保持在31.5 mg/L左右,平均去除率在80%以上,可见反应器抗COD冲击负荷能力较好。由图5(b)可知,当HRT≥10 h时,出水氨氮浓度无明显变化,基本在5.03 mg/L左右,平均去除率达到90%以上。当HRT=8 h时,氨氮去除率降低5%左右。在增加水力负荷的情况下,氨氮去除率变化不大,说明生物膜中的微生物含量较丰富,增加水力负荷对硝化作用的影响较弱<sup>[13]</sup>。可见,反应器抗氨氮冲击负荷能力良好。



a. COD



b. 氨氮

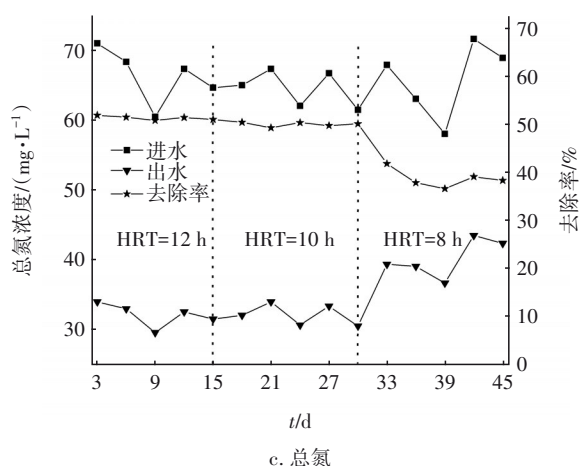


图5 反应器抗冲击负荷的性能

Fig.5 Performance of reactor resistance to shock load

由图5(c)可知,当HRT为8 h时,对总氮的去除效果较差,出水总氮浓度维持在39.40 mg/L左右,去除率仅约为40%。HRT较短时(华水罐一体化反应器好氧区与厌氧区的体积比为1:2),导致缺氧区溶解氧浓度升高,影响反硝化菌的生长繁殖。当HRT为8 h时,测定缺氧池的溶解氧,发现溶解氧浓度大于0.5 mg/L。延长HRT后,总氮去除率逐渐升高,但与艾胜书等人<sup>[14]</sup>获得的结果(平均出水总氮浓度为10.9 mg/L)相比,本系统对总氮的去除率偏低。彭永臻等<sup>[15]</sup>的研究表明,当进水C/N值为4~7时,对总氮的去除效果较好(去除率在78%左右)。而本试验进水C/N值在2.3左右,分析认为进水碳源不足限制了总氮的去除效果。

### 2.3 污染物沿程去除效果

华水罐一体化反应器挂膜成功以后,调整硝化液回流比为200%、HRT为10 h、一级和二级缺氧区流量分配比为2:1,同时确保试验水温在15℃以上。连续稳定运行30 d后,在缺氧池、好氧池、进水口、出水口等点位进行取样,并检测相关水质指标。

#### 2.3.1 COD沿程去除效果

COD浓度在华水罐一级缺氧段下降速度最快,一方面是缺氧区发生了稀释和微生物吸附作用;另一因素为AO工艺的缺氧段发生了反硝化反应,在缺氧条件下反硝化细菌利用污水中的有机物作为碳源,将硝态氮转化为氮气脱离系统。在好氧区COD浓度有所降低,有可能在悬浮球填料上的生物膜内部形成了厌/缺氧条件,微生物利用少量COD作为碳源进行反硝化作用,而且总氮浓度在好氧区的降低也验证了生物膜内部发生了反硝化反应,从

而消耗了部分碳源。同时好氧区填料上的异养菌对有机物的好氧化分解亦可能是一个原因,异养菌利用污水中的有机物和溶解氧来获取营养和能量进行生长繁殖<sup>[16]</sup>。二级缺氧段COD浓度出现升高的现象,原因是反应器采用分段进水,原水中有有机物浓度较高所致。

#### 2.3.2 总氮、氨氮沿程去除效果

反应器中氨氮和总氮的沿程变化如图6所示。可知,一级缺氧段氨氮浓度下降速度较慢,由进水的55 mg/L左右下降到40 mg/L,这是由于硝化液回流造成的稀释作用和缺氧区存在降低氨氮的自养菌。在一级好氧段硝化细菌利用进水中的氨氮进行硝化作用<sup>[17]</sup>,氨氮浓度降低较快。在二级缺氧段氨氮浓度出现短暂升高,是由于反应器采用分段进水导致的。二级好氧段的氨氮浓度进一步降低,系统对氨氮的总去除率较高。

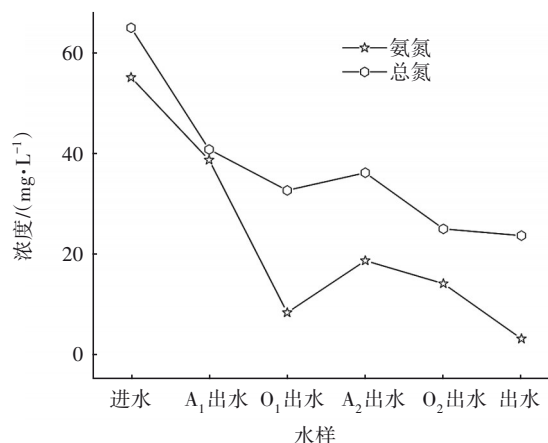


图6 反应器中氨氮和总氮的沿程变化

Fig.6 Change of ammonia nitrogen and total nitrogen concentrations along the process in reactor

一级缺氧段和一级好氧段的TN浓度逐渐降低,一级缺氧段为反硝化作用,可将系统中的硝酸盐氮转化为氮气脱离系统;一级好氧段TN浓度下降,分析原因可能是好氧区悬浮球填料上的生物膜内部形成了厌/缺氧微环境,发生短程硝化反硝化反应将含氮有机物转化为氮气脱离系统。二级缺氧段总氮浓度出现短暂升高,依然是分段进水导致的。

最优工况下,华水罐一体化反应器的出水总氮浓度在22 mg/L左右,去除率在58%左右,去除率偏低。根据理论最大脱氮效率( $\eta$ )计算公式: $\eta = (r + R) / (1 + r + R)$  ( $R$ 为污泥回流比, $r$ 为混合液回流比),

反应器在硝化液回流比为200%的情况下,最大脱氮效率在67%左右。经分析,总氮去除率偏低是由于污水的C/N值较低,即污水中有机碳源不足。厌/缺氧环境中的反硝化作用需要足够的碳源,才能有效去除污水中的含氮有机物,保证反应器出水总氮浓度达标。

## 2.4 经济性分析

华水罐一体化反应器采用二级AO生物工艺,反应器具内回流功能,无需外置硝化液回流系统,该反应器较传统二级AO工艺节约了硝化液回流系统,降低了运行费用;反应器内置悬浮球生物填料,经实测系统内污泥浓度为0.8~1.2 g/L,无需污泥回流系统,该反应器正常运行仅需1台鼓风机曝气装置。按照河南省郑州市居民用电标准电价收取,即0.56元/(kW·h)。本次试验的用电总功率为10 W、功率系数为0.55、24 h连续运行。华水罐一体化反应器处理水量为0.25 m<sup>3</sup>/d,经计算处理费用约为0.30元/m<sup>3</sup>。与我国目前运行的一体化污水处理设备相比,在只考虑运行期间电能消耗方面,运行费用低廉,更适用于农村生活污水的处理。

## 3 结论

① 华水罐一体化反应器在运行45 d左右后逐渐趋于稳定,COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN的平均出水浓度分别为30、5.74、31.55 mg/L,COD和氨氮满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》的一级排放标准。

② 华水罐一体化反应器的最佳HRT为10~12 h,其抗COD、氨氮冲击负荷等能力良好,抗总氮冲击负荷能力一般。

③ 该反应器在运行过程中仅需1台小功率鼓风机曝气泵,处理费用约为0.30元/m<sup>3</sup>。整体工艺为多级AO生物膜工艺,无需污泥回流及排泥措施,操作管理方便。

## 参考文献:

- [1] 崔荣龙, 苟文文. 浅析农村污水处理技术研究进展[J]. 广东化工, 2021, 48(24): 121-122.  
CUI Ronglong, GOU Wenwen. Analysis on the research progress of rural wastewater treatment technology [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(24): 121-122 (in Chinese).
- [2] 唐诗辉, 陈战利, 范凌, 等. 农村污水处理技术现状与

创新发展[J]. 绿色科技, 2021, 23(10): 114-116.

TANG Shihui, CHEN Zhanli, FAN Ling, *et al.* Status quo and innovative development of rural sewage treatment technology [J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, 23(10): 114-116 (in Chinese).

- [3] 周浩, 卢楠, 邹家乐, 等. 农村生活污水收集模式及污水处理现状分析[J]. 净水技术, 2021, 40(8): 90-96.

ZHOU Hao, LU Nan, ZOU Jiale, *et al.* Analysis of collection modes and existing treatment processes for rural domestic wastewater [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(8): 90-96 (in Chinese).

- [4] 白科, 陈小洁, 孙卫宁, 等. 分散式农村污水一体化处理技术研究进展[J]. 辽宁化工, 2021, 50(12): 1813-1817.

BAI Ke, CHEN Xiaojie, SUN Weining, *et al.* Research progress of distributed rural wastewater integrated treatment technology [J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(12): 1813-1817 (in Chinese).

- [5] 肖妍圻, 陈鑫, 周伟, 等. 喀斯特地区乡镇污水一体化处理技术效果分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(9): 12-16.

XIAO Xinqi, CHEN Xin, ZHOU Wei, *et al.* Performance of integrated bioreactor treating rural domestic sewage in karst area [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 12-16 (in Chinese).

- [6] 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 Yali, WANG Xia, HU Kai, *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 (in Chinese).

- [7] 李媛, 孙捷, 张永来, 等. AO与后置生物滤池工艺在村镇污水处理中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 86-93.

LI Yuan, SUN Jie, ZHANG Yonglai, *et al.* Application of anoxic-aerobic and post-biofilter processes in town sewage treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 86-93 (in Chinese).

- [8] 王智勇. 新型悬浮填料生物膜工艺处理农村污水效能研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.

WANG Zhiyong. Study on the Efficiency of a Novel Suspended Filler Biofilm Process in Rural Sewage Treatment [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020 (in

- Chinese).
- [9] 邹海明,王艳,李飞跃,等. 2种生物膜挂膜方法对比分析及其影响因素研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(10): 62-65.
- ZOU Haiming, WANG Yan, LI Feiyue, *et al.* Comparative analysis on two kinds of bio-film forming methods and its influential factors[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(10): 62-65(in Chinese).
- [10] 杨文焕,唐若凯,肖作义,等. 多级MBBR与A<sup>2</sup>O工艺处理低C/N生活污水对比分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(9): 131-135.
- YANG Wenhuan, TANG Ruokai, XIAO Zuoyi, *et al.* Comparative analysis of multi-level MBBR process and A<sup>2</sup>O process treating low C/N ratio domestic wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(9): 131-135(in Chinese).
- [11] 李慧,张潇,曹岳,等. 低温低C/N比污水微氧生物脱氮性能研究[J]. 现代化工, 2022, 42(2): 151-156.
- LI Hui, ZHANG Xiao, CAO Yue, *et al.* Research on performance of microaerobic biologically removing nitrogen from municipal wastewater with low C/N ratio at low temperature[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(2): 151-156(in Chinese).
- [12] 朱宏源. 多级A/O生物膜工艺处理低COD生活污水的脱氮效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHU Hongyuan. Nitrogen Removal Efficiency of Low COD Sewage by Multistage A/O Biofilm Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [13] 李发站,张帅,张建,等. C-CBR一体化生物反应器处理农村生活污水研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(1): 124-130.
- LI Fazhan, ZHANG Shuai, ZHANG Jian, *et al.* Study on C-CBR integrated bioreactor for treatment of rural domestic sewage [J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2018, 48(1): 124-130 (in Chinese).
- [14] 艾胜书,张莉,王帆,等. 多段多级AO生物膜反应器处理低温城市污水研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(7): 105-109.
- AI Shengshu, ZHANG Li, WANG Fan, *et al.* Study on low temperature municipal wastewater treatment by AMAO bio-film reactor [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(7): 105-109(in Chinese).
- [15] 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.
- PENG Yongzhen, PAN Cong, SUN Shihao, *et al.* Effect of influent  $p(C)/p(N)$  on the nitrogen and phosphorus removal performance of pilot-scale AAO-BAF [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(9): 904-910(in Chinese).
- [16] 郑俊,王梦琳,张德伟,等. 无泡充氧膜生物反应器对生活污水处理效果的研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 55-61.
- ZHENG Jun, WANG Menglin, ZHANG Dewei, *et al.* Effect of non-bubble aerated membrane bioreactor on domestic wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 55-61(in Chinese).
- [17] 杜振忠,王永磊,张克峰,等. 多级AO生物膜反应器的优化设计与实验研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(5): 96-99.
- DU Zhenzhong, WANG Yonglei, ZHANG Kefeng, *et al.* The optimal design and experiment study on multilevel anoxic oxic bio-film reactor [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(5): 96-99(in Chinese).

**作者简介:** 韦怀德(1983- ),男,河南濮阳人,硕士,高级会计师,主要从事水务行业全面预算及成本管理等方面的工作。

**E-mail:** 313421284@qq.com

**收稿日期:** 2022-05-24

**修回日期:** 2022-08-20

(编辑:任莹莹)