

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.010

无泡充氧膜生物反应器对生活污水处理效果的研究

郑俊^{1,2,3}, 王梦琳¹, 张德伟^{2,3}, 余沛¹, 赵梦柯¹, 张明睿¹
(1. 安徽工业大学 能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 安徽华骐环保科技股份有限公司, 安徽 马鞍山 243061; 3. 安徽省曝气生物滤池 <BAF> 工程技术研究中心, 安徽 马鞍山 243061)

摘要: 针对低碳氮比的实际生活污水,设计了一种以疏水性微孔膜作为无泡充氧和生物膜载体的膜生物反应器,研究了水力停留时间(HRT)、充氧方式、水温对反应器处理效果的影响,并探究碳、氮元素的转化途径。结果表明,在HRT为24 h、水流速度为0.068 m/s、水温为28~36℃、DO为(1.6±0.2) mg/L、充氧强度为0.035 MPa条件下,系统对COD、NH₄⁺-N和总氮的平均去除率可分别达到85.43%、72.22%、57.95%。在碳、氮元素的转化途径上,污水在通过由无泡充氧形成的生物膜的不同氧浓度梯度分层结构后,可进行同步硝化反硝化,对氨氮的去除主要依靠硝化菌完成,去除率为72.18%,对TN的去除率约为56%,而在反硝化过程中COD主要作为碳源被大量消耗,平均去除率达到85%以上。反应器主要耗能为空压机、循环泵和进水隔膜泵的电耗,无泡充氧的氧体积传质系数约为传统鼓泡式充氧的8.7倍,节约充氧电耗的潜能可达88.5%。

关键词: 无泡充氧; 膜生物反应器; 生活污水; 影响因素; 碳、氮转化途径

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0055-07

Effect of Non-bubble Aerated Membrane Bioreactor on Domestic Wastewater Treatment

ZHENG Jun^{1,2,3}, WANG Meng-lin¹, ZHANG De-wei^{1,2,3}, YU Pei¹, ZHAO Meng-ke¹, ZHANG Ming-rui¹

(1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;
2. Anhui Huaqi Environmental Protection Technology Co. Ltd., Ma'anshan 243061, China;
3. Anhui Province Biological Aerated Filter <BAF> Engineering Technology Research Center, Ma'anshan 243061, China)

Abstract: A membrane bioreactor with hydrophobic microporous membrane as the carrier of non-bubble aeration and biofilm was designed and developed, and it was applied to treat the actual domestic wastewater with low carbon and nitrogen ratio. The influence of hydraulic residence time (HRT), aeration mode and water temperature on the treatment efficiency of the reactor was studied, and the transformation pathways of carbon and nitrogen elements were explored. The average removal efficiencies of COD, NH₄⁺-N and total nitrogen reached 85.43%, 72.22% and 57.95% when HRT was 24 h, flow velocity was 0.068 m/s, water temperature was 28-36℃, DO was (1.6±0.2) mg/L and aeration intensity

was 0.035 MPa. During the transformation of carbon and nitrogen, simultaneous nitrification and denitrification took place when sewage passed through biofilm with different oxygen concentration gradients formed by non-bubble aeration. The removal of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was mainly completed by nitrifying bacteria, and the removal rate was 72.18%. Meanwhile, the removal efficiency of TN was approximately 56%. During the denitrification process, COD was mainly consumed as a carbon source and its removal efficiency was more than 85%. The main energy consumption of the reactor was air compressor power consumption, circulating pump power consumption and intake diaphragm pump power consumption. The oxygen mass transfer coefficient of non-bubble aeration was 8.7 times of that of traditional bubble aeration, and the potential energy consumption of non-bubble aeration could be saved up to 88.5%.

Key words: non-bubble aeration; membrane bioreactor; domestic wastewater; influence factor; transformation pathway of carbon and nitrogen

污水处理是一个高能耗行业,电耗为污水处理厂运营成本中最重要的重要组成部分,其能耗约占总能耗的60%~90%。通过多方分析调查发现,我国部分污水厂的电耗为 $0.26 \sim 0.41 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[1-3]。目前,我国的污水处理方法主要有活性污泥法、生物膜法和氧化法等。其中,活性污泥法存在建设和运行成本高、曝气系统电耗高、对氮和磷污染物的去除效果有限、污泥膨胀^[4]等问题;生物膜法则存在运维难度大、定期反洗、产水率受限等问题。由于传统生物膜技术为外部供氧,生物膜内外获得的氧难以平衡,表层生物膜快速消耗大量溶解氧且生长旺盛,而生物膜里层处于缺氧甚至是无氧状态,大幅度限制了生物膜法的去除效果。

为了解决常规活性污泥法和生物膜法中存在的问题,研究人员致力于缩小充氧时的气泡大小,以此来降低气泡上升速率、提高充氧率,随着膜技术的发展,将物化分离膜技术和生物膜技术相结合,开辟了污水生物处理技术研究和应用的新领域,产生了无泡充氧膜生物反应器(MABR)。MABR是一种以透气多孔膜作为生物膜生长的支撑介质,通过多孔膜无泡曝气供氧维持附着在膜壁上微生物的生命活动^[5],其采用疏水性中空纤维膜进行渗透性无泡曝气,氧气与营养底物异向传质,附着生长的生物膜内存在明显的氧气和底物浓度梯度分布,有利于硝化菌、反硝化菌共存,可为生物膜内同步硝化反硝化创造有利条件^[6]。

目前,很多学者采用MABR工艺对模拟生活污水或者人工配制的生活污水进行处理^[7-9],研究其在生活污水方面的应用以及工业化的可行性。由于大多数研究者使用的是人工模拟的生活污水,而人

工配水与实际生活污水之间存在较大的差异,不能很好地体现实际情况。因此,笔者基于实际生活污水,对MABR的性能进行了深入的探究,考察其去除各种污染物的能力。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用水为安徽华骐环保科技股份有限公司大楼化粪池的污水,具体水质:COD为 $110 \sim 160 \text{ mg/L}$,均值为 135 mg/L ; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $40 \sim 55 \text{ mg/L}$,均值为 47.50 mg/L ; TN为 $45 \sim 70 \text{ mg/L}$,均值为 57.50 mg/L ; TP为 $3 \sim 5 \text{ mg/L}$,均值为 4 mg/L ; pH值范围为 $7.5 \sim 8.5$,均值为 8.0 。该污水具有水质相对稳定、氮磷含量较高,以及呈弱碱性等特点,其碳氮比为2.4,属于比较典型的低碳氮比生活污水。

接种污泥为马鞍山市南部污水处理厂(氧化沟工艺)带式压滤机的脱水泥饼,反应器内污泥的接种量为 800 mg/L 。投加污泥的相关性能参数如下:MLVSS/MLSS为0.54,污泥浓度为 36.57 g/L (以MLSS计)。

膜组件采用疏水性微孔膜——复合PVDF改性高分子材料制成的中空纤维膜,将610根中空纤维膜丝的两端用环氧树脂胶固定于膜壳中,构成帘式膜组件。膜材料的基本适应条件:温度为 $10 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$, pH值为 $2 \sim 12$,操作压强为 $0.01 \sim 0.05 \text{ MPa}$ 。

无泡充氧膜生物反应器由有机玻璃制成,长为 66.5 cm 、宽为 48.5 cm 、高为 72 cm ,有效容积为 232 L 。管路上设有压强表和气体流量计,用来监测充氧压强、气量等参数。反应器内设有回流管线,由磁力循环泵将污水回流至进水方向,管线上设有调节阀和液体流量计,用来控制回流量的大小。膜生

物反应器如图1所示。

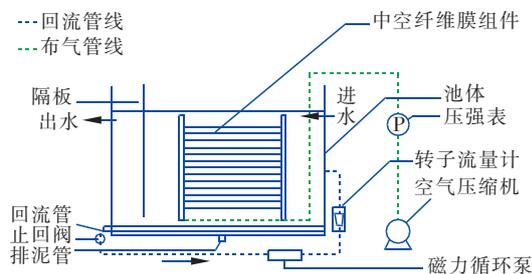


图1 膜生物反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of membrane bioreactor

1.2 分析项目及方法

COD采用重铬酸钾法测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂光度法测定, TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, TP采用钼锑抗分光光度法测定, 碱度采用酸碱指示剂滴定法测定, MLSS和MLVSS均采用重量法测定, DO采用便携式溶解氧仪测定, pH值采用pH计测定。

2 结果与讨论

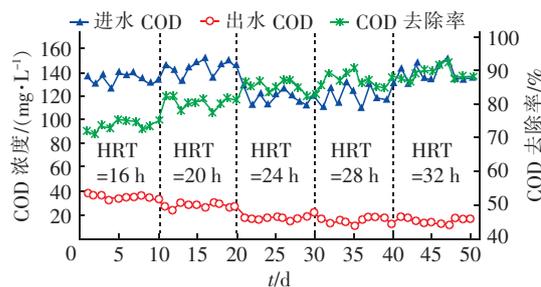
2.1 水力停留时间对污染物去除效果的影响

系统挂膜启动后, 将进水量依次调节为350、280、233、200、175 L/d, 即水力停留时间(HRT)分别为16、20、24、28、32 h, 各运行10 d。具体运行参数: 进水中COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN分别为110~152、40~55、45~61 mg/L, DO为 (1.6 ± 0.2) mg/L, 水温为16~25 °C, 水流速度为0.045 m/s, 充氧强度为0.035 MPa。分析不同HRT条件下, 反应器对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN去除效果的影响。

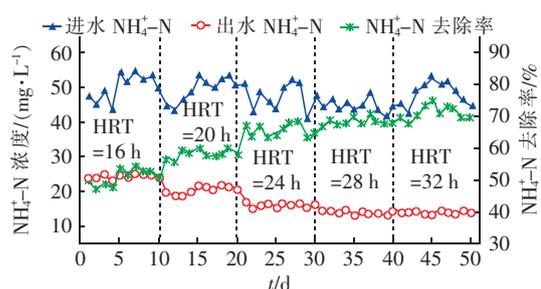
2.1.1 对COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果的影响

图2为HRT对COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果的影响。可以看出, 平均进水COD为131.28 mg/L, 当HRT分别为16、20、24 h时, 平均出水COD分别为33.14、27.60、17.20 mg/L, COD平均去除率分别为73.72%、80.75%、85.30%, 当HRT超过28 h时, 平均出水COD均低于17.45 mg/L, COD平均去除率达到88.29%。平均进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为47.6 mg/L, 当HRT分别为16、20、24、28、32 h时, 平均出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为24.17、20.45、16.10、13.94、13.79 mg/L, 氨氮平均去除率分别为51.12%、58.35%、65.60%、68.48%、71.13%。随着HRT的增加, 反应器对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率不断升高, 且两者随HRT的增加去除率变化趋势大致相当。这是由

于COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的降解均为好氧分解, HRT越长使得污染物与微生物的接触时间越长, 物质交换和降解过程越充分。



a. 对COD的去除



b. 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

图2 HRT对COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果的影响

Fig. 2 Effect of HRT on COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal

当HRT在24 h以下时, 随着HRT的延长, COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率均快速增长, 但是出水COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度还相对较高。这可能是由于水力停留时间还不够长, 大量COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 未能与生物膜进行充分的物质交换; 或微生物量还不够多, 生物反应不够充分; 或好氧生物过程提供给微生物的氧量不够充分, 抑制了微生物对污染物的充分降解。而当HRT处于28 h以上时, 继续延长HRT, COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果提高不明显, 说明反应器内微生物降解污染物的量已趋于饱和, 这是由于HRT的延长导致了微生物膜不断增厚, 增加了膜内传质阻力, 并且生物膜老化导致了活性降低等。反应器内污染物浓度限制了微生物总量, 反应器对污染物的去除量逐渐达到饱和状态, 其去除率变化不大且可影响反应器的处理能力。可见适当延长HRT, 反应器内有机物浓度大幅度降低, 而过度延长HRT, 会使生物膜上部分微生物发生内源呼吸作用, 削减了生物膜厚度和微生物总量。郑斐^[8]利用MABR工艺处理人工污水的结果表明, 在一定范围内延长HRT能大幅度提高对COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除能力, 这与本试验得到的结论类似。

2.1.2 对 TN 去除效果的影响

图3为HRT对TN去除效果的影响。可以看出,随着HRT的延长,反应器对TN的去除率呈先快速增加后趋于稳定的趋势。当HRT为16h时,TN平均去除率为29.74%;当HRT为28h时,TN平均去除率达到52.98%;当HRT为32h时,TN平均去除率为48.70%。当HRT<28h时,随着硝化反应不断进行,累积的硝态氮和亚硝态氮促进了反硝化过程,同时由于水体中有机碳源较多,因此反硝化能够较快完成,TN去除率逐渐增加。继续延长HRT,出水TN浓度开始上升,这是因为随着HRT的延长,导致单位负荷降低,异养菌和硝化菌对溶解氧的消耗减弱,使得水中溶解氧浓度上升,抑制了反硝化过程;同时较长的HRT使异养微生物对水中有机物的降解也较完全,导致水体中有机碳源大大减少,反硝化过程所需的碳源不足,反硝化过程被抑制,上述原因降低了反应器对TN的去除效果。

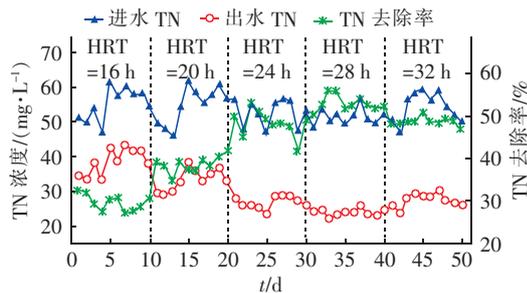


图3 HRT对TN去除效果的影响
Fig.3 Effect of HRT on TN removal

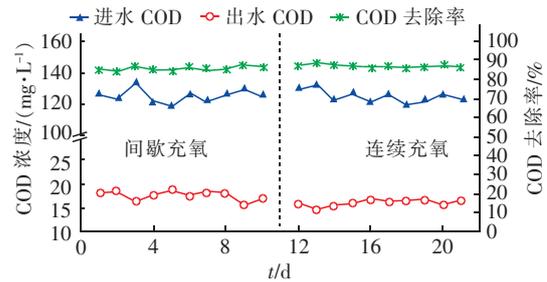
2.2 充氧方式对污染物去除效果的影响

试验期间,间歇充氧的操作流程为开启空压机10h后停止充氧2h,然后恢复充氧。运行时,反应器仍然连续进水。具体运行参数如下:水流速度为0.068 m/s,停留时间为24h,DO为(1.6±0.2) mg/L,水温为28~32℃,充氧强度为0.035 MPa。平均进水COD为126 mg/L、NH₄⁺-N为49 mg/L、TN为55.59 mg/L、TP为4 mg/L。本阶段试验为期22d,间歇充氧10d后缓冲2d,再连续充氧10d,检测出水水质的变化。

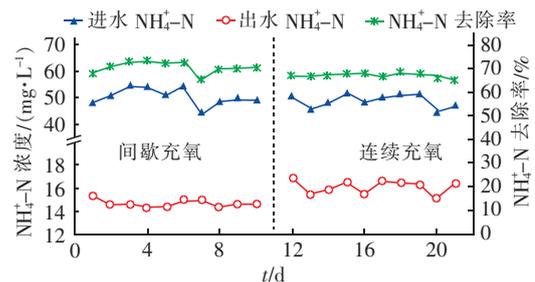
2.2.1 对COD和NH₄⁺-N去除效果的影响

图4为充氧方式对COD和NH₄⁺-N去除效果的影响。从图4(a)可以看出,间歇充氧和连续充氧方式下对COD的去除效果都比较稳定,COD平均去除率分别为85.58%和86.77%。在连续充氧方

式下,由于生物膜的分层结构,反应器对有机物的消耗主要是好氧微生物的同化作用和反硝化作用;而当间歇充氧停止充氧时,反硝化菌的反硝化过程和异养菌降解有机物作用对碳源的消耗占主要部分,同时在间歇充氧恢复充氧后,反应器内DO浓度迅速升高,硝化菌及异养微生物开始进行有氧呼吸过程,此时又消耗水中有机物,从而使得两者的COD去除率稳定且大致相当。



a. 对COD的去除



b. 对NH₄⁺-N的去除

图4 充氧方式对COD和NH₄⁺-N去除效果的影响

Fig.4 Effect of aeration mode on COD and NH₄⁺-N removal

从图4(b)可以看出,间歇充氧和连续充氧方式下,系统对NH₄⁺-N都具有良好的去除效果,平均去除率分别为70.45%和67.29%,间歇充氧对氨氮的去除效果略优于连续充氧。分析原因,可能是由于在连续充氧方式下异养微生物和硝化菌存在竞争关系,两者均竞争氧气,且彼此的生存空间也受影响;而在间歇充氧方式下,存在一段时间的充氧空档期,此时污水依然不断地进入反应器使得反应器里NH₄⁺-N浓度变高,促进了硝化过程,并且此时反硝化等过程也在消耗碳源,减轻了竞争压力,对氨氮进行了有效去除。

2.2.2 对TN去除效果的影响

图5为充氧方式对TN去除效果的影响。可以看出,平均进水TN浓度为55.59 mg/L,间歇和连续充氧方式下对TN的平均去除率分别为53.80%和

50.90%,可见,两种方式下对TN的去除效果相当。其原因可能是:①停止充氧阶段,反应器内提供了更多的兼氧、厌氧环境,使得反硝化过程持续时间更长;②当无充氧时,好氧异养菌不会对碳源进行争夺,但同时硝化作用会受到抑制,硝态氮和亚硝态氮的积累减少,影响反硝化过程的进行。

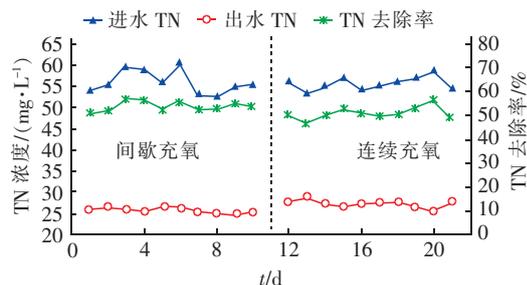


图5 充氧方式对TN去除效果的影响

Fig. 5 Effect of aeration mode on TN removal

2.3 水温对污染物去除效果的影响

在水流速度为0.068 m/s、HRT为24 h、DO为 (1.6 ± 0.2) mg/L、充氧强度为0.035 MPa的条件下,考察水温对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN去除效果的影响,结果如图6所示。可以看出,水温对反硝化除碳脱氮效果的影响较显著,随着水温的上升,对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除率不断升高。当水温为13~18℃时,对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的平均去除率分别为63.91%、27.31%、19.55%;随着水温上升,对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除率也在增大,当水温上升到28~36℃时,平均去除率分别提高到85.43%、72.22%、57.95%,且硝化作用的效率也在提高,反硝化除碳脱氮效果在3个温度范围的差异明显。

当水温较低(13~18℃)时,由于微生物的活性降低,尤其是反硝化菌,导致对总氮的去除效果不明显。当水温为18~28℃时,该温度有益于反应器内底物的扩散和反硝化菌的生长,反硝化菌活性增强,同步硝化反硝化过程对除碳脱氮的效果明显增加。由于硝化菌和亚硝化菌的最佳温度范围不同,当超过30℃时反硝化菌的活性减弱,但与此同时,亚硝化菌变得活跃,其对氧气的利用率高于硝化菌,增殖速率较快,能够实现亚硝化菌的积累^[10],此时反应器内的短程反硝化处于优势,进一步去除COD和总氮。根据Arrhenius公式,温度系数 θ 可以描述温度对反硝化速率的影响,当微生物数量一定时,升高温度可以增强细胞内的化学反应,提高酶的活性,从而

加速有机物的降解。

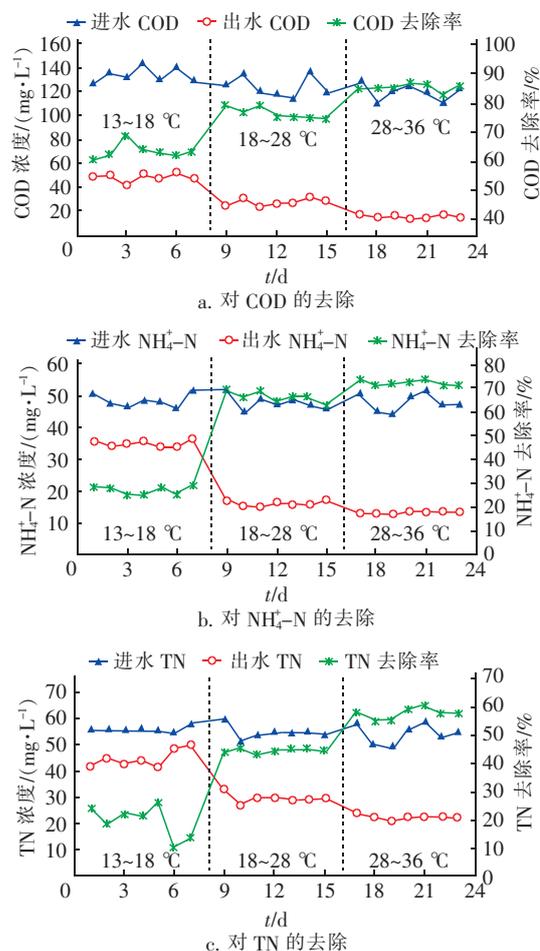


图6 水温对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN去除效果的影响

Fig. 6 Effect of temperature on COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN removal

2.4 反应器内碳、氮转移途径分析

污水进入反应器并通过无泡充氧形成的生物膜分层结构后,进行同步硝化反硝化,氨氮的去除主要依靠硝化菌完成。生物膜内侧与膜丝接触直接吸收氧气,且有机物浓度较低,进而形成了高氧低碳的环境,因此避免了好氧异养菌的干扰,硝化菌易于在生物膜内部生长繁殖,特别是生长在内侧靠近氧源的硝化菌可以获得较充足的氧进行硝化反应,因此氨氮的去除率较高。

图7为进出水中氮元素的变化。可以看出,反应器内硝化过程进展良好,氨氮的转化率较高,去除量为34.53 mg/L,去除率达到72.18%,生物膜内部的高氧低碳环境提高了硝化菌的活性,减少了异养菌对氧气的争夺,使得氨化作用显著;硝态氮和亚硝态氮的浓度分别提高了1.93和3.93 mg/L,表明硝

化菌和亚硝化菌的活性较高,使得硝态氮和亚硝态氮均有增长富集的迹象,并且出水含量不高,表明相关反应也在生物膜内进行;总氮去除量约为 29.11 mg/L,去除率为 55.85%。同时发现,进水中主要以氨氮为主,占总氮的 91.79%;但在出水中氨氮仅占 57.84%,硝态氮和亚硝态氮的占比明显提高。可见,大量的氨氮转化为硝态氮和亚硝态氮,促进了反硝化过程的进行。氨氮通过硝化作用转化成硝态氮和亚硝态氮,再通过短程硝化反硝化和同步硝化反硝化作用去除,使得出水氨氮、硝态氮和亚硝态氮均处于较低水平,由此降低了污水中总氮浓度。

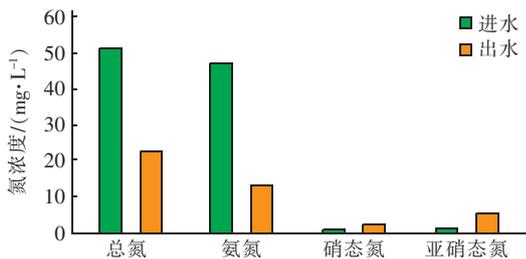


图7 进出水中氮浓度的变化

Fig. 7 Change of nitrogen concentration in influent and effluent

生物反硝化过程需要提供足够数量的有机物(碳源),保证一定的碳氮比才能使反硝化反应顺利进行,此时污水中的有机物就作为碳源充当电子供体进行反硝化,从而有效地去除有机物。氧气从膜丝内逸出,生物膜兼氧区存在着大量异养菌,处在生物膜中层的异养菌仍可以获得氧气进行氧化反应,所有的异养菌都可以利用 COD 作为碳源,也可以通过碳代谢的方式将其降解,完成对 COD 的去除。

2.5 系统能耗分析

以中试装置为基础,评价 MABR 过程的水处理成本,结果见表 1。

表 1 中试装置的工程设备与功率

Tab. 1 Equipment and power of pilot plant

项目	性能指标	数量/台	开启时间/(h·d ⁻¹)	功率/W
磁力循环泵	流量为 3.2 L/min, 扬程为 8 kPa	1	24	6
空气压缩机	气量为 50 L/min, 压强为 0.030 MPa	1	20 或 24	35
电磁隔膜泵	流量为 54 L/h	1	24	40

从表 1 可以看出,反应器的主要能耗来自以下 3 部分:磁力循环泵、空气压缩机和电磁隔膜泵。控

制系统、开关等能耗几乎不随操作过程变化而改变。目前,污水厂的主要能耗为二级处理中的鼓风机,占总能耗 50% 以上。而无泡充氧的氧体积传质系数约为传统鼓泡式充氧的 8.7 倍,节约充氧电耗的潜能可达 88.5%。

试验证明,反应器在氧传质性能上有着明显优势,并且其较低的充氧能耗、较少的辅助设备,更有利于降低污水处理成本。采用中空纤维膜进行无泡充氧不但能减小污水处理设备的单位体积,还能降低操作成本,因此是污水处理中具有应用前景的新型工艺。

3 结论

① 当 HRT 为 24 h、水温为 16~25 ℃、DO 为 (1.6±0.2) mg/L 时, MABR 对污染物有较好的去除效果,增加 HRT 后尽管去除率有小幅增加,但会降低反应器的处理效率。

② 间歇充氧方式和连续充氧方式下对污染物的去除效果并无较大差异,两者对 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除率分别仅相差 1.19%、3.16%、2.90%,可见减少充氧时间也能够得到相同的处理效果。因此可以减少空压机的能耗,降低污水处理成本,延长空压机的使用寿命。中试装置的耗能主要为空压机、循环泵和进水隔膜泵的电耗,无泡充氧的氧体积传质系数约为传统鼓泡式充氧的 8.7 倍,节约充氧电耗的潜能可达 88.5%。

③ 水温较低(13~18 ℃)时,反应器对污染物的去除效果一般;在水温为 18~28 ℃ 条件下,同步硝化反硝化过程占主导地位,对 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除率提高至 77.18%、65.82% 和 45.57%;当水温为 28~36 ℃ 时,短程反硝化过程较活跃,对 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除效果较好,平均去除率分别为 85.43%、72.22% 和 57.95%。

参考文献:

- [1] 常江,杨岸明,甘一萍,等. 城市污水处理厂能耗分析及节能途径[J]. 中国给水排水,2011,27(4):33-36.
Chang Jiang, Yang Anming, Gan Yiping, et al. Energy consumption analysis and energy saving solutions in WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(4): 33-36 (in Chinese).
- [2] 姚远,张丹丹,楚英豪. 城市污水处理厂中的能耗及能源综合利用[J]. 资源开发与市场,2010,26(3):

- 202-205.
- Yao Yuan, Zhang Dandan, Chu Yinghao. Energy consumption and its comprehensive utilization [J]. Resource Development & Market, 2010, 26(3): 202-205 (in Chinese).
- [3] 沈晓铃, 薛敏, 李大成, 等. 无锡惠山污水厂的优化运行与节能降耗[J]. 中国给水排水, 2011, 27(22): 45-47.
- Shen Xiaoling, Xue Min, Li Dacheng, *et al.* Optimization operation, energy saving and consumption reduction in Wuxi Huishan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(22): 45-47 (in Chinese).
- [4] 徐天凯, 彭党聪, 徐涛, 等. 城市污水处理厂 A²/O 工艺污泥膨胀与上浮的诊断[J]. 中国给水排水, 2016, 32(23): 31-35.
- Xu Tiankai, Peng Dangcong, Xu Tao, *et al.* Diagnosis of sludge bulking and floating in A²/O process in municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(23): 31-35 (in Chinese).
- [5] 张文丽, 程方, 丁小洋, 等. 曝气压力对 MABR 中同步硝化反硝化脱氮的影响[J]. 环境工程, 2017, 35(10): 55-60.
- Zhang Wenli, Cheng Fang, Ding Xiaoyang, *et al.* Effects of aeration pressure on simultaneous nitrification and denitrification in membrane aeration bioreactor [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(10): 55-60 (in Chinese).
- [6] 包涵, 张卫东, 宫正, 等. 膜曝气生物膜反应器运行单级自养脱氮工艺功能型菌群特性研究[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1461-1467.
- Bao Han, Zhang Weidong, Gong Zheng, *et al.* Functional microbial community in a membrane-aerated biofilm reactor operated for completely autotrophic nitrogen removal [J]. Environmental Science, 2009, 30(5): 1461-1467 (in Chinese).
- [7] 田海龙. MABR 脱氮除碳效能及微生物膜特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- Tian Hailong. Study on Carbon & Nitrogen Removal Performance and Biofilm Characteristics of MABR for Municipal Wastewater Treatment [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015 (in Chinese).
- [8] 郑斐. 无泡曝气膜生物反应器的初步研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- Zheng Fei. Preliminary Study on Membrane Aeration Biofilm Reactor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004 (in Chinese).
- [9] 张慧敏. MABR 处理模拟生活污水的运行效能及污染物降解动力学研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- Zhang Huimin. MABR Study of Operation Efficiency and Kinetic Model of Pollutant Degradation with Simulated Domestic Wastewater [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015 (in Chinese).
- [10] 彭永臻, 马斌. 低 C/N 比条件下高效生物脱氮策略分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 225-230.
- Peng Yongzhen, Ma Bin. Review of biological nitrogen removal enhancement technologies and processes under low C/N ratio [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2): 225-230 (in Chinese).



作者简介: 郑俊(1965-), 男, 江苏宜兴人, 本科, 教授, 主要研究方向为水环境污染控制及水体修复技术。

E-mail: zhengjun6642@163.com

收稿日期: 2020-01-25