

# 基于 MUCT 工艺的酿造废水脱氮除磷研究

冯强<sup>1</sup>, 陈亚平<sup>2</sup>, 杨开明<sup>1\*</sup>, 母宣怡<sup>1</sup>, 蒙美旭<sup>2</sup>

(1. 西华大学土木建筑与环境学院, 四川 成都 610039;

2. 四川省生态环境科学研究院, 四川 成都 610040)

**摘要:**采用 MUCT 工艺作为处理高氮磷浓度酿造废水好氧处理单元, 考察装置分别处于全程硝化与短程硝化两阶段时对氮、磷元素的处理效果。全程硝化阶段, 考察水力停留时间以及在缺氧 I 池投加碳源改变 C/N 条件下工艺对酿造废水处理效果的影响, 结果表明, 当水力停留时间 HRT 为 10 h、缺氧 I 区 C/N 为 6 时, 工艺对装置的处理效果最优, 原水阶段氨氮、总磷平均去除率分别能达到 66.17% 和 74.03%。短程硝化阶段, 缩短 HRT 至 8 h, 控制 DO 质量浓度在 0.5~0.8 mg/L, 以亚硝态氮积累率 (NAR) 作为区分全程与短程硝化两阶段的指标, 最终在混合液回流比为 150%、硝化液回流比为 250%、回流污泥比为 90% 时, 成功启动短程硝化; 原水阶段, NAR 稳定在 60% 左右, 氨氮去除率在 50% 以上, TP 平均去除率达到 77.94%, 最高达 91.59%。

**关键词:** MUCT; 酿造废水; 处理效果; 全程硝化; 短程硝化

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)11-0159-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.11.033

## Study on removal of nitrogen and phosphorus from brewing wastewater based on MUCT process

FENG Qiang<sup>1</sup>, CHEN Ya-ping<sup>2</sup>, YANG Kai-ming<sup>1\*</sup>, MU Xuan-yi<sup>1</sup>, MENG Mei-xu<sup>2</sup>

(1. College of Civil Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610040, China)

**Abstract:** MUCT process is used as an aerobic treatment unit to treat with brewing wastewater with high concentrations of nitrogen and phosphorus. In the whole-cut nitrification stage, the effects of different HRT and C/N in anoxic I tank are investigated. The results show that the process presents the best treatment effect with average removal rates of ammoniacal nitrogen and total phosphorus in raw water stage reaching 66.17% and 74.03%, respectively when HRT is 10 h and C/N in anoxic I tank is 6. As for short-cut nitrification stage, HRT is shortened to 8 h, the concentration of DO is controlled at 0.5~0.8 mg·L<sup>-1</sup>, and the accumulation rate of nitrite nitrogen (NAR) is used as the index to distinguish whole-cut nitrification from short cut nitrification. Finally, the short-cut nitrification is successfully started up when the reflux ratio of mixed liquor is 150%, the reflux ratio of nitrification liquid is 250%, and the reflux sludge ratio is 90%. In the raw water stage, NAR remains around 60% stably, the removal rate of ammoniacal nitrogen exceeds 50%, and the average removal rate of total phosphorus reaches 77.94% with the highest at 91.59%.

**Key words:** MUCT; brewing wastewater; treatment effect; whole-cut nitrification; short-cut nitrification

酿造业是我国国民经济重要组成部分, 每年产值达上千亿元, 有研究表明, 酿制过程中有 70% 的水会转化为废水<sup>[1]</sup>。酿造废水除了具有有机物浓度高、pH 低、臭味大等特点<sup>[2]</sup>, 总氮、总磷浓度也远远高于生活污水的含量, 需经处理达到《发酵酒精和白酒工业水污染物排放标准》(GB 27631—2011) 之后才能排入水体, 当前普遍采用的是“厌氧+好氧+深度处理”工艺流程<sup>[3]</sup>。

好氧单元脱氮除磷过程主要是硝化菌、反硝化菌、聚磷菌 3 类菌群共同参与完成。硝化菌在脱氮过程中细分为氨氧化菌 (AOB) 与亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 2 大类。全程硝化是脱氮过程硝化阶段中

NOB 成为优势菌群的处理机制; 短程硝化则是控制硝化阶段稳定在 AOB 起主要作用的亚硝化阶段。

MUCT (Modified University of Cape Town) 工艺是 UCT 工艺的改良, 缺氧池一分为二, 既保证了高效脱氮又消除了回流污泥中的硝态氮对厌氧释磷过程的冲击。其多用于处理低碳氮比的城市生活污水且处理效果良好<sup>[4-5]</sup>, 对诸如酿造废水的高浓度工业废水的研究很少。在依托课题研究的剑南春酒厂污水处理厂提标改造项目中, 把多级 AO 工艺作为好氧处理单元, 目前存在碳源投加量大、易发生丝状菌膨胀、剩余污泥产量高的问题。因此, 笔者采用 MUCT 工艺作为好氧处理单元对剑南春酒厂高效沉

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-09-03

基金项目: 四川省科技计划项目 (2019JDZH0002)

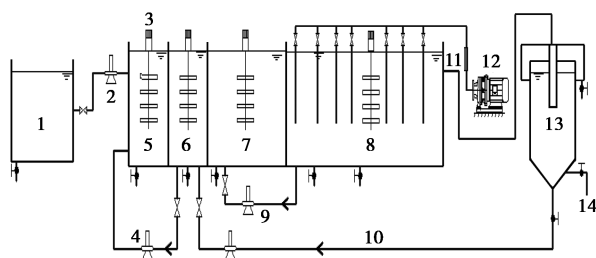
作者简介: 冯强 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工业废水污染防治治理, 649842259@qq.com; 杨开明 (1971-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为水污染控制技术, 通讯联系人, 372536276@qq.com。

淀池出水进行处理。通过对全程硝化与短程硝化 2 个阶段进行对比,探究 MUCT 工艺处理酿造废水的最优参数,达到解决聚磷菌和硝化菌的泥龄矛盾、降低碳源投加量、节省曝气量以及减少污泥产量的目的。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验工艺流程及运行情况

试验装置为 MUCT 模型,材质为有机玻璃,具体如图 1 所示。装置分为生物反应区与二沉池,反应区为容积比 1:1:2:3 的厌氧池、缺氧 I 号池、缺氧 II 号池、好氧池构成,总容积为 63 L;二沉池为平流式沉淀池,容积为 50 L。通过磁力搅拌器使各个池子水力完全混合;进水、硝化液回流、混合液回流、回流污泥用蠕动泵控制;用空气泵及曝气头给好氧池供氧,转子流量计控制溶解氧(DO)浓度,好氧池 DO 浓度通过雷磁溶解氧仪实时监控。在各个池子壁上开多个取样口,方便取样。



1—水箱;2—蠕动泵;3—搅拌器;4—混合液回流;  
5—厌氧池;6—缺氧 I 池;7—缺氧 II 池;8—好氧池;  
9—硝化液回流;10—回流污泥;11—转子流量计;  
12—空气泵;13—沉淀池;14—剩余污泥

图 1 MUCT 工艺流程图

### 1.2 试验方案

研究过程分为全程硝化与短程硝化 2 个阶段,每个阶段又具体细分为模拟废水阶段与实际废水阶段,时间跨度为 5~10 月,装置用恒温电缆维持温度在 25~28℃,用碳酸钠调节进水 pH 在 7.5 左右。在全程硝化阶段,使好氧池 DO 质量浓度为 3~4 mg/L,每日从二沉池底部排放剩余污泥维持污泥龄(SRT)12 d,使好氧池的污泥质量浓度(MLSS)控制在 4 000 mg/L 左右。控制缺氧 I 池到厌氧池的混合液回流比( $\alpha$ )为 100%,好氧池到缺氧 II 池的硝化液回流比( $\beta$ )为 200%,二沉池到缺氧 I 池的回流污泥比( $\gamma$ )为 90%。主要考察水力停留时间(HRT)与 C/N 对氮磷元素去除率的影响。水力停留时间(HRT)对试验脱氮除磷影响尤为显著,有研究表明,

MUCT+MBR 组合工艺对城市生活污水的最佳水力停留时间为 8 h,这是因为城市污水的污染物浓度低以及生物膜的高效截留作用<sup>[6]</sup>。当处理此类高氮磷工业废水时,应适当延长 HRT 使微生物协同完成有机物降解功能。调整蠕动泵进水流量进而控制 HRT 在 12、10、8 h,每个工况稳定后,连续测得 15 d 的实验数据,确定最佳水力停留时间后,投加碳源,增加 C/N,提高系统的脱氮除磷效率。

短程硝化阶段直接在全程硝化末期连续运行。采用低氧曝气方式严格控制好氧池 DO 质量浓度在 0.3~1.0 mg/L<sup>[7-8]</sup>。通过缩短 HRT(9、8、7 h)与加大硝化液回流比( $\beta$ (250%、300%))淘洗掉系统中大量的 NOB,富集 AOB,提高亚硝态氮积累率(NAR)<sup>[9]</sup>,待其大于 50%时,认为短程硝化阶段启动成功。

### 1.3 试验用水及接种污泥

试验期间进水各项指标保持在一定区间,模拟废水阶段的水通过人工配比使其与剑南春污水处理厂一期处理工艺高效沉淀池出水水质一致,以氯化铵、麦克碳、磷酸二氢钾作为模拟废水中氮、碳、磷以及微量元素的来源,具体成分如表 1 所示。待试验效果较好时通过加入不同比例实际酿造废水,建立污泥的耐受性,最后实际废水阶段全部取高效沉淀池出水作为进水。接种污泥取自剑南春污水处理厂二沉池的回流污泥,静置倾去上清液投加进好氧池后闷曝 1 d,然后配置最佳营养比(COD:TN:TP=100:5:1)的水倒入所有格室。采用内循环(不进水)方式运行,每运行 6 h 静置 0.5 h,排掉好氧池表面清液,连续运行 2 d。通过镜检观察有少量鳃虫,说明此时污泥活性得到恢复,开始模拟废水阶段,待装置脱氮除磷效果稳定后,每日跟踪取样测定。

表 1 配水水质成分

水质指标	范围	平均值
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	250~385	265
NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	40~80	67
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	20~40	30.5
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	60~120	78

### 1.4 水质分析方法

试验期间每日需对进水、出水以及每个池子的水质指标进行分析并记录数据,COD、TP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N 采用快速检测法,TN 采用国标法,具体检测方法如表 2 所示。

表 2 水质指标检测方法

序号	测定指标	测定方法	国标号
1	COD	高锰酸钾法	GB 11914—1989
2	TP	钼锑抗分光光度法	GB 11893—1989
3	TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	HJ 636—2012
4	亚硝酸盐氮	紫外分光光度法	GBT 7493—1987
5	硝酸盐氮	酚二磺酸光度法	GBT 7480—1987
6	氨氮	纳氏试剂分光光度法	HJ 535—2009
7	溶解氧	JPBJ-608 型便携式溶解氧分析仪	
8	pH	DZS-706-A 多参数分析仪	
9	MLSS	重量法	

以亚硝态氮积累率(NAR)为区分短程反硝化阶段与全程反硝化阶段的指标:

$$NAR = C(NO_2^- - N) / [C(NO_2^- - N) + C(NO_3^- - N)]$$

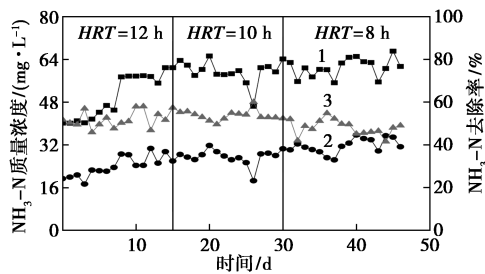
式中: $C(NO_2^- - N)$ 与 $C(NO_3^- - N)$ 分别为好氧格室末端出水中 $NO_2^- - N$ 与 $NO_3^- - N$ 的质量浓度,mg/L。

## 2 试验结果分析

### 2.1 全程硝化反硝化阶段

#### 2.1.1 停留时间的影响

不同 HRT 条件下 MUCT 装置对  $NH_3-N$ 、TP 的处理效果分别如图 2、图 3 所示。由图 2 可知,当 HRT 为 12、10、8 h 时,氨氮的平均去除率分别为 52.19%、53.54%、47.85%,HRT 为 10 h 时, $NH_3-N$  最高去除率达到 60.05%。随着 HRT 的缩短,装置对氨氮的去除能力也随之降低。因为充足的曝气量使得溶解氧扩散到活性污泥絮体内部,好氧区的硝化菌在较长的 HRT 里通过代谢使得  $NH_3-N$  充分转

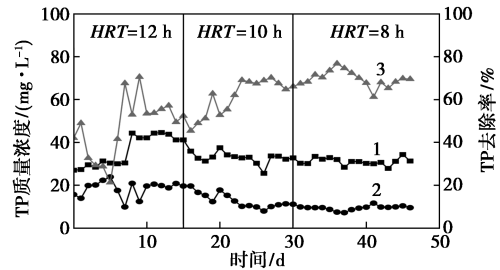


1— $NH_3-N$  进水;2— $NH_3-N$  出水;3— $NH_3-N$  去除率

图 2 不同 HRT 条件下对  $NH_3-N$  的去除率

化成  $NO_3^- - N$ ,有助于提高  $NH_3-N$  与 TN 的去除率。当 HRT 为 12 h 时,氨氮平均去除率较 10 h 更低,因为当 C/N 一定时,前端的释磷菌和反硝化菌会充分利用有机物完成释磷和反硝化作用,使得进入好氧

池的 COD 质量浓度不足以满足硝化菌群硝化作用的需要。由图 3 可知,当 HRT 为 12、10、8 h 时,TP 平均去除率在 47.23%、62.87%、69.85%,这是因为 HRT 的缩短有助于泥龄较短的聚磷菌富集,完成厌氧释磷和好氧吸磷过程。

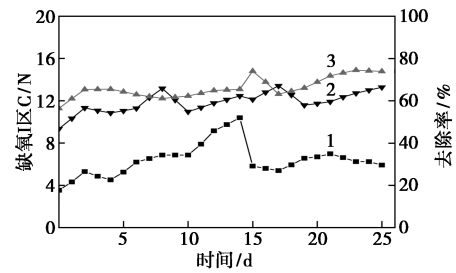


1—TP 进水;2—TP 出水;3—TP 去除率

图 3 不同 HRT 条件下对 TP 的去除率

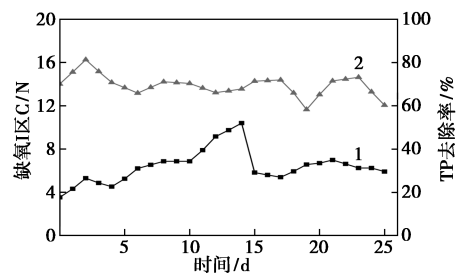
#### 2.1.2 外加碳源的促进作用

在稳定 HRT 为 10 h 的条件下,投加麦克碳补充进水 COD,试验结果发现,随着进水 C/N 的增加,缺氧 I 池的 COD 质量浓度始终维持在 160 mg/L 以下,缺氧 II 池的 COD 质量浓度在 70 mg/L 以下,所以直接补充进水碳源对 MUCT 工艺氨氮的去除效果没有明显改善。通过投药装置在缺氧 I 池投加碳源,不同 C/N 比对工艺脱氮除磷的处理效果如图 4、图 5 所示。由图 4 可知,随着 C/N 增加到 6 左右时,该工艺对氨氮的去除效果最优,最高去除率为 74.03%,平均去除率达到 66.17%;再继续增加 COD



1—缺氧 I 区 C/N;2—TN 去除率;3— $NH_3-N$  去除率

图 4 缺氧 I 区不同 C/N 对脱氮机制的影响



1—缺氧 I 区 C/N;2—TP 去除率

图 5 缺氧 I 区不同 C/N 对除磷机制的影响

的质量浓度对脱氮机制的促进作用有限。由图 5 可知, C/N 的增加对工艺除磷效果的影响不大, 平均去除率只提高了 6.56%。这是因为在除磷机制中, 对除磷影响作用最大的是聚磷菌的释磷阶段, 有研究表明, MUCT 工艺厌氧释磷量与系统总除磷率成正比<sup>[10]</sup>, 在此工艺中厌氧池中的 COD 质量浓度已满足释磷菌的需求。

## 2.2 短程硝化反硝化阶段

短程硝化期主要分为 NAR 积累期、NAR 调控期以及短程硝化稳定期 3 个阶段。各个阶段好氧池出水  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 以及 NAR 变化如图 6 所示, 试验期间进出水氨氮浓度及其去除率如图 7 所示。

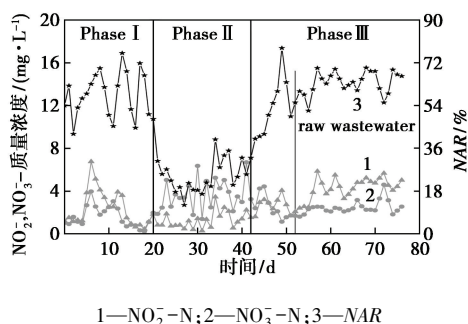


图 6 短程硝化期 NAR 变化情况

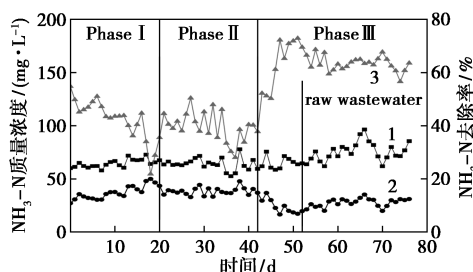


图 7 短程硝化期  $\text{NH}_3$ -N 去除率变化

### 2.2.1 短程硝化的实现对脱氮的影响

第 1 阶段为系统内部硝化菌群的适应期, 缩短 HRT 至 9 h 运行 7 d, 控制转子流量计使好氧区 DO 质量浓度在 0.3~0.5 mg/L 区间内, 维持污泥龄 12 d,  $\alpha$ 、 $\gamma$  不变, 增大  $\beta$  至 300%。由图 6 阶段 I 可以看出, 亚硝氮积累率 NAR 在很短的时间内迅速上升至 50%, 继续缩短 HRT 至 8 h (14 d), NAR 得到进一步上升, 最高可达 76.07%。但是此阶段的氨氮去除效果较差, 平均去除率只有 41.72%。本阶段亚硝氮积累率大幅上升的原因主要是水力停留时间 HRT 的缩短以及进水的高氨氮负荷。试验期间模拟水质氨氮负荷普遍高于城市污水处理厂, HRT 的缩短将进一步加大装置的氨氮负荷, 研究表明, 高氨

氮负荷有利于 AOB 的增殖<sup>[11]</sup>, AOB 将氨氮氧化成亚硝态氮后, NOB 在较短的时间里不足以把系统内部的亚硝态氮氧化成硝态氮。以上两因素淘洗掉了系统内部的 NOB, 使得 AOB 得到富集。但是此阶段后期出现了少量的丝状菌, 污泥沉降性能变差,  $SV_{30}$  大于 60%, 污泥有从黄褐色泛白的趋势。原因是通过每日从二沉池底部排除剩余活性污泥, 造成系统内部生物相的减少, 污泥质量浓度 (MLSS) 一度下降至 2 500 mg/L, 继续下降, 将会对菌胶团产生冲击, 不利于装置运行。

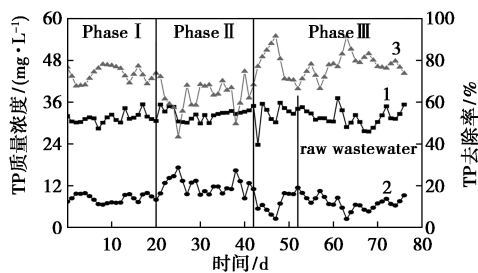
第 2 阶段是为了稳定装置脱氮除磷效果的调控期, 适当加大好氧池曝气量以及投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  解决丝状菌引起的污泥膨胀问题。为进一步探究 HRT 是否对短程硝化的实现起决定性作用, HRT 缩短至 7 h, 好氧池 DO 质量浓度控制在 0.8~1.0 mg/L, 减少  $\beta$  到 250%, 为增加活性污泥中微生物含量, 污泥龄由 12 d 增加至 20 d<sup>[12]</sup>, 其他条件不变。这一阶段氨氮去除率停止继续下降的趋势, 由阶段 I 末期最低去除率 21.87% 增加至本阶段最高去除率 50.41%, 平均去除率为 39.68%。由图 7 可知, 此阶段氨氮平均去除率虽然低于第 1 阶段, 但很稳定, 原因是阶段 I 由全程硝化末期直接过渡而来, 阶段 I 前期好氧池污泥中还含有大量的 NOB 菌群, 系统内部菌群的改变相对于参数的调整在时间上有一定的滞后。由图 6 阶段 II 可知, 经过 22 d 的运行, 亚硝态氮积累率快速下降, 平均 NAR 只有 24.57%, 最低达到 12.13%。造成本阶段 NAR 的下降有两方面的原因: ① SRT 的延长: 泥龄的延长通过减少排泥量实现, 排泥不充分使得沉淀池底部会积累大量污泥且会造成除磷效果变差, 有部分亚硝态氮会在二沉池中转化成硝态氮, 然后回流至缺氧 I 号池; ② DO 质量浓度的适当增加: 理论上 AOB 以及 NOB 的氧半饱和系数分别是 0.25~0.6 mg/L 与 0.72~2.2 mg/L<sup>[13]</sup>, 在污泥质量浓度较低时, NOB 对 DO 质量浓度的变化更为敏感。阶段 II 后期污泥质量浓度增加至 3 000 mg/L。

第 3 阶段是短程硝化稳定期。待脱氮效果稳定后, 恢复 HRT 至 8 h, 控制 DO 质量浓度为 0.5~0.8 mg/L。为维持系统的活性污泥浓度以及提高 TP 的去除率, 加大混合液回流比  $\alpha$  至 150%,  $\alpha$  与  $\gamma$  的差值越大, 对系统的除磷效果越好, 其余条件不变。从图 6 阶段 III 中可以看出, 该阶段 NAR 积累率 10 d 之内再一次超过 50%, 出现短程硝化 3 个阶段最大值 78.18%, 且氨氮平均去除率大于 60%。在

如此短的时间内  $NAR$  快速上升的原因是系统一直处于低  $DO$  质量浓度与短  $HRT$  的条件运行 78 d, 系统内的 AOB 菌群一直存在且活性增强, 当处于适应环境时, AOB 菌群的竞争优势就显现出来。待短程硝化稳定后, 以酒厂高效沉淀池实际出水作为进水连续运行 24 d, 从图 6 阶段 III 中可以看出,  $NAR$  一直保持在 60% 左右, 但相对于配水, 原水阶段的氨氮去除率有些许下降, 这与原水中含有的一些苯酚及芳香烃类有机物有关, 相关研究表明<sup>[14]</sup>, 这类物质将对硝化反应产生抑制作用。

### 2.2.2 短程硝化对除磷的影响

短程硝化期各阶段除磷率如图 8 所示。由图 8 中可以看出, 短程硝化稳定期 TP 平均去除率为 77.94%。对比分析全程硝化  $HRT$  为 8 h 时, MUCT 工艺对 TP 的平均去除率提高了 8%, 说明短程硝化的实现对磷的去除有一定的促进作用。阶段 II 出水总磷变高的原因主要是排泥不充分以及硝化菌对碳源的竞争。



1—TP 进水; 2—TP 出水; 3—TP 去除率

图 8 短程硝化期 TP 去除率变化

## 3 结论

(1) 采用 MUCT 工艺作为处理高氮磷酿造废水的好氧处理单元, 控制混合液回流比为 100%、硝化液回流比为 200% 和回流污泥比为 90%。当装置处于  $DO$  质量浓度为 2~3 mg/L、 $HRT$  为 10 h、污泥质量浓度为 4 g/L 和  $SRT$  为 12 d 的全程硝化条件并达到稳定状态时, 处理效果最优, 氨氮和总磷的平均去除率分别为 53.54% 和 62.87%。为增强处理效果, 在缺氧 I 池投加碳源, 增加  $C/N$ , 试验发现当  $C/N$  为 6 时, 工艺对氨氮的处理率能提高至 66.17%, 最高达 74.03%;  $C/N$  的增加对 TP 的去除影响有限, 平均去除率只提高了 6.56%。

(2) 通过缩短  $HRT$  与降低好氧池  $DO$  质量浓度, 由全程硝化阶段向短程硝化阶段转化, 以亚硝氮积累率 ( $NAR$ ) 作为区分 2 个阶段的指标。最终在 8 h 的  $HRT$ 、0.5~0.8 mg/L 的  $DO$  质量浓度、混合液

回流比为 150%、硝化液回流比为 250% 与回流污泥比为 90% 条件下实现处理酿造废水短程硝化阶段。在转化过程中, 为防止污泥流失和保证系统足够的污泥浓度, 延长  $SRT$  至 20 d。试验发现, 短程硝化的实现不仅节约额外的碳源投加, 还使  $NAR$  维持在 60% 以上。最终原水阶段氨氮平均去除率稳定在 50% 以上, TP 平均去除率达到 77.94%, 最高达 91.59%。

(3) MUCT 工艺作为处理高浓度酿造废水的生物单元时, 无论在全程硝化阶段还是短程硝化阶段, COD 出水都能达到《发酵酒精和白酒工业水污染物排放标准》(GB 27631—2011) 的行业排放限值, 但 TN、 $NH_3-N$ 、TP 出水 3 个指标需经进一步的深度处理才能达标排放。

## 参考文献

- [1] Valta K, Kosanovic T, Malamis D, et al. Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(12): 3335-3347.
- [2] Amenorfenyo D K, Huang X, Zhang Y, et al. Microalgae brewery wastewater treatment: Potentials, benefits and the challenges[J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(11): 1910.
- [3] 王富花. 白酒酿造中废水处理方法及工程治理措施[J]. 酿酒科技, 2013, 12: 80-84.
- [4] 曾薇, 张洁, 纪兆华, 等. MUCT 工艺处理生活污水短程脱氮的实现及硝化菌群动态变化[J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2533-2541.
- [5] Zeng W, Wang X D, Li B X, et al. Nitritation and denitrifying phosphorus removal via nitrite pathway from domestic wastewater in a continuous MUCT process[J]. Bioresource Technology, 2013, 143: 187-195.
- [6] 杨阳, 杨长军, 许家龄, 等. 水力停留时间对 MUCT-MBR 工艺运行性能的影响[J]. 水处理技术, 2020, 46(5): 97-101.
- [7] Tokutomi T. Operation of a nitrite-type airlift reactor at low  $DO$  concentration[J]. Water Science and Technology, 2004, 49(5-6): 81-88.
- [8] Laurenzi M, Weissbrodt D G, Villez K, et al. Biomass segregation between biofilm and flocs improves the control of nitrite-oxidizing bacteria in mainstream partial nitritation and anammox processes[J]. Water Research, 2019, 154: 104-116.
- [9] Qian W T, Peng Y Z, Li X Y, et al. The inhibitory effects of free ammonia on ammonia oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria under anaerobic condition[J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 1247-1250.
- [10] 鹿钦礼, 王晓玲. MUCT 工艺不同硝化液内循环比的 PHA 和磷代谢[J]. 当代化工, 2012, 41(3): 308-311, 327.
- [11] Poot V, Hoekstra M, Geleijnse M A A, et al. Effects of the residual ammonium concentration on NOB repression during partial nitritation with granular sludge[J]. Water Research, 2016, 106: 518-530.
- [12] 张小玲. 低溶解氧下 SBR 内短程硝化影响因素试验研究[J]. 环境科学与技术, 2011, (1): 163-166.
- [13] Fux C, Boehler M, Huber P, et al. Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitritation and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant[J]. Journal of Biotechnology, 2002, 99(3): 295-306.
- [14] 徐勋. 沉积型微生物燃料电池同步去除苯酚及脱氮性能[J]. 中国给水排水, 2016, 32(13): 31-35. ■