



移动扫码阅读

陆人春,倪燕霞,胡文坚,等.生物倍增工艺在生猪养殖废水处理工程中的应用[J].能源环境保护,2022,36(6):138-143+158.

LU Renchun, NI Yanxia, HU Wenjian, et al. Application of bio-doubling process in the pig breeding wastewater treatment project[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(6):138-143+158.

# 生物倍增工艺在生猪养殖废水处理工程中的应用

陆人春<sup>1</sup>,倪燕霞<sup>1</sup>,胡文坚<sup>1</sup>,吴硕涛<sup>1</sup>,刘兴利<sup>1</sup>,王长智<sup>2</sup>,梅荣武<sup>2</sup>

(1.中煤科工集团杭州研究院有限公司,浙江 杭州 311200;2.浙江省环境保护科学设计研究院,浙江 杭州 310007)

**摘要:**为实现生猪养殖废水稳定达标排放,采用生物倍增工艺处理生猪养殖废水。试验结果表明:在回流比为50:1、HRT为150 h、DO为0.3~0.5 mg/L、MLSS为6~8 g/L的条件下,生物倍增工艺出水COD<sub>Cr</sub>、氨氮浓度可以达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准限值要求(COD<sub>Cr</sub>浓度≤100 mg/L、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度≤15 mg/L);相比A/O工艺,生物倍增工艺处理生猪养殖废水节约了近30%的占地面积,缩短了约70%的水力停留时间,减少了约50%吨水处理用电量。

**关键词:**生猪养殖废水;生物倍增;废水处理工程;COD;氨氮

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)06-0138-06

## Application of bio-doubling process in the pig breeding wastewater treatment project

LU Renchun<sup>1</sup>, NI Yanxia<sup>1</sup>, HU Wenjian<sup>1</sup>, WU Shuotao<sup>1</sup>,  
LIU Xingli<sup>1</sup>, WANG Changzhi<sup>2</sup>, MEI Rongwu<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Hangzhou 311201, China;  
2. Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** The bio-doubling process was applied to the treatment of pig breeding wastewater to meet the discharge standards stably. The results showed that the effluent concentrations of COD<sub>Cr</sub> and ammonia nitrogen by the bio-doubling process met the Class I discharge standard of Integrated Wastewater Discharge Standard (GB 8978—1996) ( $c_{\text{COD}_{\text{Cr}}} \leq 100 \text{ mg/L}$ ,  $c_{\text{NH}_4\text{-N}} \leq 15 \text{ mg/L}$ ), when reflux ratio was 50:1, HRT was 150 h, DO concentration was 0.3~0.5 mg/L and MLSS concentration was 6~8 g/L. Compared with the traditional A/O process, the bio-doubling process reduced about 30% of the floor area, 70% of hydraulic retention time and 50% of power consumption per ton water for the pig breeding wastewater treatment.

**Key Words:** Pig breeding wastewater; Bio-doubling; Wastewater treatment project; COD; Ammonia nitrogen

## 0 引言

在浙江省,生猪养殖业作为农村居民收入的重要来源和城镇居民菜篮子工程的重要组成部分,一直保持着快速发展的势头,生猪养殖污染问题也日趋突出。

生猪养殖废水具有有机质、氨氮浓度高,水力

冲击负荷大等特点。目前浙江省多采用厌氧-好氧处理模式和自然处理模式相结合的方法处理生猪养殖废水后外排周边水体<sup>[1]</sup>。

生猪养殖废水厌氧处理单元(如黑膜沼气池、UASB反应器、IC反应器等)可有效去除废水中的可溶性有机质,COD去除率可达到85%左右<sup>[2]</sup>,但厌氧处理对废水中氨氮的去除效率不佳<sup>[3]</sup>,甚

收稿日期:2022-04-17;责任编辑:金丽丽

基金项目:浙江省环境污染控制技术重点实验室开放基金项目(Zjshky2019-4)

第一作者简介:陆人春(1963—),男,浙江富阳人,硕士,正高级工程师,主要从事水处理技术研究和应用、环保咨询等工作。

E-mail:705647728@qq.com

至由于含氮污染物氨化分解,会释放出更多氨氮<sup>[4]</sup>,导致厌氧处理后的废水碳氮比较低,可生化性差<sup>[2]</sup>,增加了后续处理难度。以一个万头猪场为例,其日排粪污水高达 100~150 t,废水净化技术难度可想而知。

近年来,我国引进了一种新的生化处理技术—生物倍增技术。该技术目前主要用于市政污水处理<sup>[1]</sup>、ABS 废水处理<sup>[5]</sup>,也有运用于石化工业污水处理<sup>[6]</sup>,该技术运用后,可以有效减少废水处理占地面积、处理成本,提高处理效率<sup>[7]</sup>。

生物倍增技术在生猪养殖废水处理中的运用较少,笔者运用该技术处理生猪养殖场废水,寻求一个相对合适的工艺参数,使废水经处理后能稳定达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中一级标准限值要求( $\text{COD}_{\text{Cr}} \leq 100 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N} \leq 15 \text{ mg/L}$ )。试验结果可供其他生猪养殖场参考借鉴。

## 1 生物倍增技术

生物倍增工艺由德国 Engelbart 公司最先提出<sup>[7]</sup>,是一种新型活性污泥法工艺,具备氧化沟循环流的特征,采取一体化结构布局,流程紧凑,占地节省。它最大的特点是池内高污泥浓度和曝气区低溶解氧的运行方式。该工艺以传统活性污泥法为基础,在生化池进水端将来水以内循环方式高倍稀释,污水的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  浓度越高,自动控制的稀释倍数越高,从而形成了平缓的降解梯度,使得活性污泥系统的驯化环境相对稳定,因而在特殊的控制条件下(低溶解氧、高污泥浓度),保证了生物处理池中所驯化培养的微生物数量最大化、菌群特殊化、降解高效化,从而有效降解水中的有机污染物。

表 1 试验组基本信息

Table 1 Basic information of the test group

清粪方式	生猪年出栏头数/头	猪舍建筑面积/ $\text{m}^2$	废水平均产生量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	废水平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	污水处理占地面积/ $\text{m}^2$
干清粪	20 000~30 000	40 000	约 250	约 12.5	约 9 933

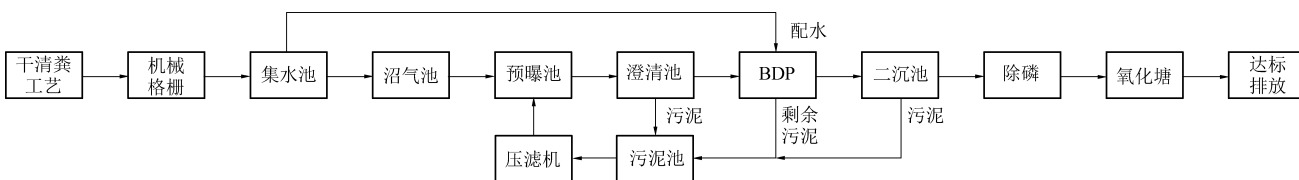


图 1 试验组废水处理工艺图

Fig.1 Wastewater treatment process diagram of the test group

废水通过管道收集、机械格栅进行固液分离后,进入集水池均质,再进入沼气池中进行厌氧发酵处理,经厌氧发酵处理后的沼液泵入预曝池后,再进入

生物脱氮的基本原理是在有机氮转化为氨态氮的基础上,先利用好氧段的硝化细菌和亚硝化细菌通过硝化作用将氨氮转化为亚硝态氮、硝态氮,再利用厌氧段的反硝化菌通过反硝化作用将硝氮转化为氮气。传统生物处理池中溶解氧浓度(DO)较高,异养菌增殖快,污泥絮体大,形成隔离水膜,生长缓慢的硝化菌只能被“包埋”在污泥絮体内。为了使硝化反应得以有效地进行,必须保持废水中较高的 DO 值。与之相比,生物倍增生物处理池中的活性污泥颗粒小,污泥活性相对较低,异养菌生长缓慢;活性污泥外表不易形成隔离膜,活性污泥可与氧及可溶性有机物直接接触,实现氨氮的短程硝化;在曝气池进口区,大量可溶性有机物将很快实现氧化降解;曝气区内的溶解氧也同时被迅速消耗降低趋于零,有利于后续的反硝化反应彻底进行。

因此,生物倍增工艺在有效去除水中有机污染物的同时,又创造了同步短程硝化反硝化脱氮条件,在曝气区中实现了脱氮过程。

## 2 试验组概况

试验选择了浙江省杭州市同一地方的 2 家规模生猪养殖场,均采用干清粪工艺,其中一家污水处理采用了生物倍增工艺,另一家污水处理采用现有传统 A/O 污水处理工艺作为对照组,本次试验就 2 家污水处理工艺的主要单元(生物倍增单元和 A/O 单元)进行比较。

### (1) 试验组生猪养殖场基本情况

运用生物倍增工艺的生猪养殖场基本信息见表 1。主要废水处理工艺如图 1 所示。

澄清池进行絮凝沉淀、固液分离,然后进入生物倍增反应池(BDP),去除  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、氨氮等污染物,出水进入二沉池,沉池上清液经加药混合后流入化学除磷池除

去废水中残留的磷,出水最终进入氧化塘。

试验组提标改造后的污水处理系统主要运行参数见表2。

(2)对照组生猪养殖场基本情况

采用传统A<sup>2</sup>/O污水处理工艺的生猪养殖场基本情况见表3。

表2 试验组废水处理系统主要运行参数

Table 2 Main operating parameters of the wastewater treatment system in the test group

构筑物名称	尺寸规格	有效容积/m <sup>3</sup>	主要运行参数
集水池	6 m×4 m×2.6 m	50	停留时间约4 h
沼气池	—	4 000	停留时间约320 h
污泥池	4 m×2 m×2.6 m	16	—
澄清池	12 m×2 m×3.5 m	65	停留时间约5.2 h,设计表面负荷:0.89 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
中间水池	8 m×2 m×5.0 m	80	停留时间约6.4 h
生物倍增池	50 m×8 m×5 m	1 880	停留时间约150 h,采用气提回流,每米曝气管服务面积:0.156 m <sup>2</sup> ,其余参数见试验结果
二沉池	8 m×6 m×5 m	180	停留时间约14.4 h,设计表面负荷:0.96 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
化学除磷	—	35	停留时间约2 h
氧化塘	—	—	停留时间约45 d

表3 对照组基本信息

Table 3 Basic information of the control group

清粪方式	生猪年出栏头数/头	猪舍建筑面积/m <sup>2</sup>	废水平均产生量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	废水平均流量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	污水处理占地面积/m <sup>2</sup>
干清粪	20 000~30 000	50 000	约270	约13.5	约13 967

该生猪养殖场废水处理方案如图2所示。

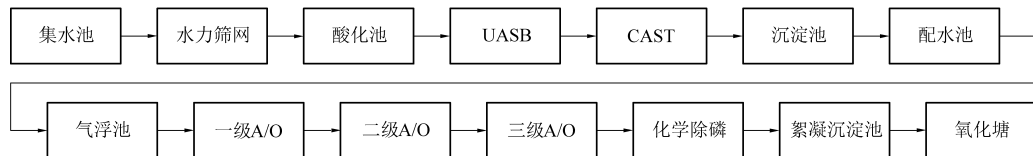


图2 对照组废水处理工艺图

Fig.2 Wastewater treatment process diagram of the control group

污水通过管道收集进入集水池,再通过水力筛网进行固液分离后进入水解酸化池,酸化好的污水再泵入厌氧反应器中经过厌氧发酵处理。经厌氧发酵处理后的沼液自流入沉淀池进行沉淀,进一步处理后进入调节配水池,配水池配好的水,

经气浮后泵入三级A/O处理系统,其出水进入终沉池处理,沉淀后污泥部分回流至三级A/O池。终沉池上清液经加药混合后流入化学除磷池除去废水中残留的磷,然后排入氧化塘。

对照组污水处理系统主要运行参数见表4。

表4 对照组废水处理系统主要运行参数

Table 4 Main operating parameters of the wastewater treatment system in the control group

构筑物名称	总容积/m <sup>3</sup>	主要运行参数
集水池	1 000	停留时间约74 h
酸化池	1 000	停留时间约74 h
UASB	1 500	容积负荷5~7 kg COD <sub>Cr</sub> /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
CAST	1 500	SV18%, MLSS4 g/L, 污泥龄12~15 d
沉淀池	1 000	停留时间约74 h,表面负荷:0.62 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
配水池	600	停留时间约45 h
气浮池	13	停留时间约1 h
A/O池	8 000	停留时间约593 h, 0.1~0.15 gBOD <sub>5</sub> /(g/MLSS·d)
化学除磷	756	停留时间56 h
絮凝沉淀池	350	停留时间约26 h,沉淀池表面负荷:1.14 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)。
氧化塘	—	停留时间约45 d

### 3 试验主要内容及研究目标

本次试验通过对试验组和对照组的养殖废水水质进行分析,包括 pH、COD<sub>Cr</sub>、氨氮等,选择合适的污泥浓度、回流比以及溶解氧浓度等,最终确保废水 COD<sub>Cr</sub>、氨氮达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中一级标准限值要求( $c_{\text{COD}_{\text{Cr}}} \leq 100 \text{ mg/L}$ 、 $c_{\text{NH}_4^+-\text{N}} \leq 15 \text{ mg/L}$ )。

### 4 处理工艺试验研究

#### 4.1 溶解氧

根据生物倍增技术的特点,溶解氧浓度一般控制在 0.3~0.5 mg/L,在该溶解氧状态下,可以使生物池同时实现水解酸化和短程同步硝化反硝化功能<sup>[8]</sup>。使得微生物对难降解有机物适应性更强,在曝气池就可以进行脱氮。因此,本次试验生物倍增工艺溶解氧控制在 0.3~0.5 mg/L。

#### 4.2 污泥浓度

一般污泥浓度越高,有机物的去除效率越好,但污泥浓度过高,需氧量就会增大,对溶解氧浓度的控制具有一定的难度,反应环境可能存在缺氧状态,导致整体生化过程对有机物去除率下降。本次试验将溶解氧浓度控制在 0.3~0.5 mg/L,保持低溶解氧环境下,进行污泥浓度对沼气池出水的氨氮、COD<sub>Cr</sub> 去除效率的影响,如图 3 所示。

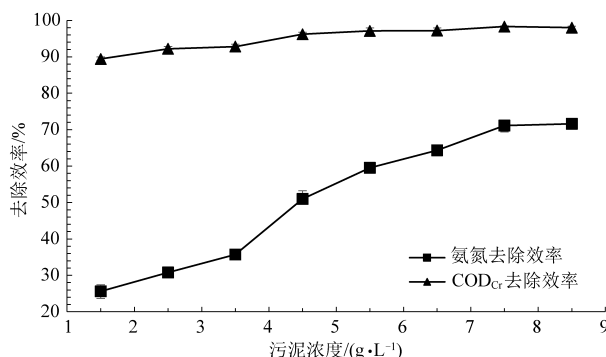


图 3 污泥浓度对氨氮和 COD<sub>Cr</sub> 去除效率的影响

Fig.3 Effect of sludge concentration on the removal efficiencies of ammonia nitrogen and COD<sub>Cr</sub>

在试验条件下,污泥浓度达到 4 g/L 后氨氮去除率快速提升,但到 8 g/L 后,去除率提升缓慢;COD<sub>Cr</sub> 去除率也随着污泥浓度的提高保持提升趋势,污泥浓度 8 g/L 时 COD<sub>Cr</sub> 去除率达到最高。综合考虑氨氮和 COD<sub>Cr</sub> 的去除效率,本次试验在低溶解氧(0.3~0.5 mg/L)环境下,确定污泥浓度 6~8 g/L 较为合理。

#### 4.3 回流比

在上述参数基础上,本次试验模拟了试验组废水污染物浓度最大的情景,采用了 4 种回流比(20:1、30:1、50:1、75:1)进行循环稀释试验。每次试验在保证溶解氧浓度和污泥浓度的前提下进行,每次持续试验时间为 2 周。根据检测结果,生物倍增工艺出水 COD<sub>Cr</sub>、氨氮浓度见表 5。

表 5 不同回流比生物倍增工艺污染物出水浓度

Table 5 Effluent concentrations of pollutants by the bio-doubling process with different reflux ratios

序号	回流比	沼气池出水污染物最大浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )		生物倍增池出水浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	
		COD <sub>Cr</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	COD <sub>Cr</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
1	20:1			160.34~213.52	23.25~30.33
2	30:1	4 500	930	132.27~180.37	15.95~20.48
3	50:1			58.07~93.99	5.41~14.51
4	75:1			38.29~73.20	4.49~11.32

经过一段时间的调整试验,回流比越大,处理效果越好,但考虑经济情况,在回流比 50:1 的时候,既可以满足达标排放标准要求,也可以使经济

相对实惠。

#### 4.4 工艺参数确定

经过试验,最终确定生物倍增工艺参数见表 6。

表 6 试验组生物倍增池主要运行参数

Table 6 Main operating parameters of bio-doubling pool in the test group

构筑物名称	废水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	有效容积/m <sup>3</sup>	主要运行参数
生物倍增池	约 250	1 880	①采用气提回流,每米曝气管服务面积:0.156 m <sup>2</sup> ,DO 0.3~0.5 mg/L ②MLSS 6~8 g/L ③回流比 50:1 ④水力停留时间 150 h

## 5 工程运行效果与分析

### 5.1 运行记录统计

试验组 2021 年 10 月 23 日—2021 年 11 月 21 日运行统计废水污染物浓度情况见表 7。

对照组 2021 年 10 月 23 日—2021 年 11 月 21 日

表 7 试验组废水污染物监测结果

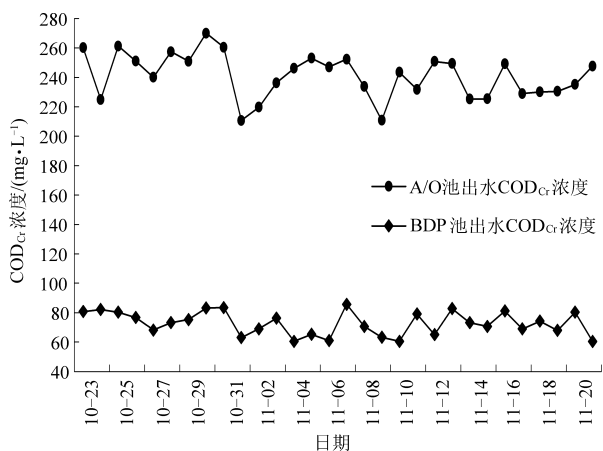
Table 7 Monitoring results of wastewater pollutants in the test group

污染物	沼气池出水浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	生物倍增池出水浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
$\text{COD}_{\text{Cr}}$	3 540~4 120	60.43~85.71
氨氮	583~895	7.30~12.39

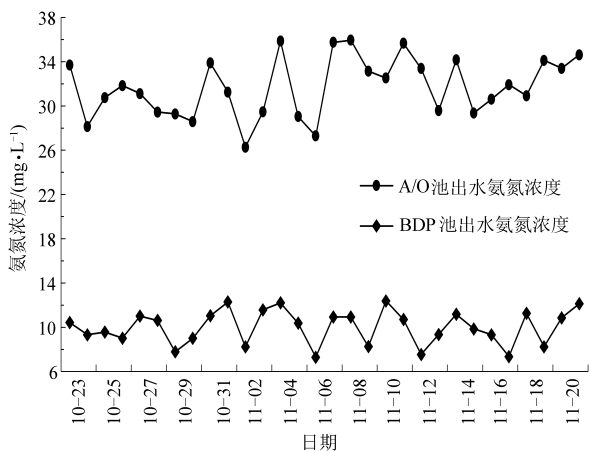
表 8 对照组废水污染物监测结果

Table 8 Monitoring results of wastewater pollutants in the control group

污染物	UASB 出水浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	A/O 池出水浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
$\text{COD}_{\text{Cr}}$	3 420~4 170	142.81~187.79
氨氮	596~934	17.90~25.88



(a) BDP池和A/O池出水化学需氧量浓度比较



(b) BDP池和A/O池出水氨氮浓度比较

图 4 生物倍增工艺和 A/O 工艺出水  $\text{COD}$  和氨氮浓度对比  
Fig.4 Comparison of  $\text{COD}$  and ammonia nitrogen concentrations between bio-doubling process and A/O process

根据比较,在预处理出水浓度相近的情况下,

日运行统计废水污染物浓度情况见表 8。

### 5.2 数据对照分析

在厌氧处理出水浓度相对接近的情况下,生物倍增池和 A/O 池出水中化学需氧量和氨氮的浓度对比、化学需氧量和氨氮的处理效率对比分析如图 4、图 5 所示。

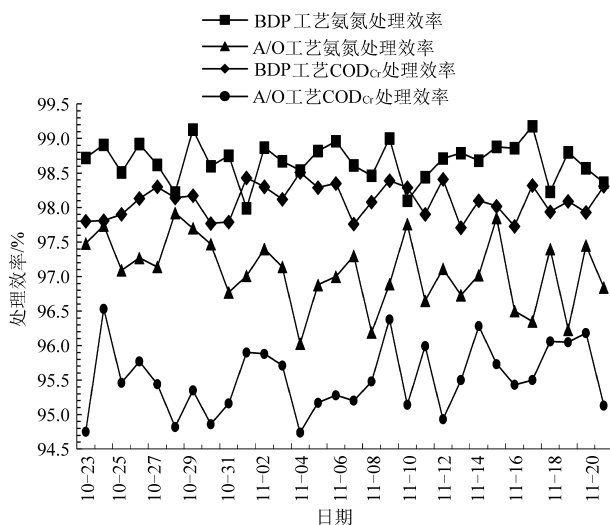


图 5 生物倍增工艺和 A/O 工艺  $\text{COD}$  和氨氮处理效率对比  
Fig.5 Comparison of  $\text{COD}$  and ammonia nitrogen removal efficiencies between bio-doubling process and A/O process

试验组的生物倍增池出水污染物浓度比三级 A/O 池低,出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  浓度可稳定控制在  $100 \text{ mg/L}$  以下,氨氮浓度可稳定控制在  $15 \text{ mg/L}$  以下。

### 5.3 生物倍增工艺与 A/O 工艺综合比较

#### (1) 废水处理池占地面积

对照组 A/O 池占地面积约  $1 600 \text{ m}^2$ ,以万头猪出栏量换算,每万头猪废水处理设施占地面积  $533 \text{ m}^2$ ;试验组生物倍增池占地面积约  $400 \text{ m}^2$ ,以万头猪出栏量换算,每万头猪废水处理设施占地面积  $160 \text{ m}^2$ ,相比 A/O 工艺占地面积更小。

#### (2) 用电情况

A/O 池主要用电设施为提升泵、回流泵和鼓风机,最大电机功率约 135 kW,平均每吨用电量约 13 kW·h,电费约 8.1 元/t 水;生物倍增池主要用电设施为提升泵和鼓风机,最大电机功率约 45 kW,平均每吨水用电量约 4.3 kW·h,电费约 2.7 元/t 水,相比之下生物倍增池处理吨水的用电量不足 A/O 池的 50%。

### (3) 人工管理、维护情况

A/O 池占地面积较大,所需设备和管理人员较多,设备、曝气管等的更换、维护力度大;生物倍增池占地面积较小,所需设备及管理人员较少,曝气装置采用软管布置,可以实现不停机更换,相比 A/O 工艺,生物倍增工艺人工费用较少,设备及部件更换、维护力度较小。

### (4) 药剂投加情况

试验组和对照组的药剂投加主要体现在化学除磷上,两者废水量相似,废水污染物总磷浓度相仿,投加药剂量相差不大,药剂费用差距不大。

### (5) 溶解氧浓度

A/O 池缺氧段 DO 浓度不大于 0.2 mg/L,好氧段 DO 浓度 3~5 mg/L;生物倍增池 DO 浓度 0.3~0.5 mg/L,相比 A/O 工艺,生物倍增工艺所需溶解氧浓度更小,鼓风机能耗可以降低约 25%~40%。

### (6) 水力停留时间

对照组 A/O 工艺水力停留时间约 593 h;试验组生物倍增工艺水力停留时间约 150 h,比 A/O 工艺短。

### (7) 出水 COD<sub>Cr</sub>、氨氮浓度

相比 A/O 工艺,在进水水质类似的情况下,生物倍增工艺处理效率更高。

综上,运用生物倍增工艺主要呈现以下 3 个优势:

#### ① 处理效率高,水力停留时间短

相比 A/O 工艺,生物倍增工艺节省了生化反应时间,水力停留时间更短,在类似的进水指标条件下,生物倍增工艺处理效率更高,尤其是氨氮处理效率。

#### ② 占地面积小

相比 A/O 工艺,生物倍增工艺节约了约 30% 的占地面积。

#### ③ 直接运行成本更低

相比 A/O 工艺,生物倍增工艺溶解氧浓度仅需 0.3~0.5 mg/L,大大减少了鼓风机等设备能耗,

维护简便,电费、人工费等直接运行成本较少。

## 6 结 论

根据废水处理规模相近、废水预处理工艺相似的两家养殖场对比试验结果,相比传统 A/O 工艺,采用生物倍增工艺处理生猪养殖废水,在保持“回流比 50 : 1, HRT 150 h, DO 浓度 0.3~0.5 mg/L, MLSS 6~8 g/L”的参数条件下,出水可以稳定达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准要求;同时,生物倍增工艺可以节省生化反应时间,缩短水力停留时间,节约占地面积和直接运行成本。

## 参考文献

- [1] 庄仲昌, 庄昌伟, 王克云. 生物倍增 (Bio-dopp) 工艺处理城市污水 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33 (10): 103-105.  
ZHUANG Zhongchang, ZHUANG Changwei, WANG Keyun. Treatment of municipal wastewater with Bio-dropp [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33 (10): 103-105.
- [2] 张广润. BIOLAK+水解酸化+A<sub>2</sub>/O+化学氧化工艺处理猪场沼液的应用研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 2.
- [3] 汪文强. 规模化猪场粪污废水常规生化/物化组合工艺处理效果、存在问题及改进 [D]. 南京: 南京农业大学, 2018: 7-9.
- [4] 苏冠谕. MAP-SBBR 组合工艺处理猪场沼气池出水的研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2017: 3-9.
- [5] 林长松. 生物倍增技术处理 ABS 废水 [D]. 上海: 上海师范大学, 2016: 4-12.
- [6] 李文博, 丁爱中. 生物倍增技术处理石油化工综合污水中试研究 [J]. 弹性体, 2013, 23 (2): 64-68.  
LI Wenbo, DING Aizhong. Pilot study of treating petroleum chemical comprehensive sewage by using Bio-Dopp technique [J]. China Elastomerics, 2013, 23 (2): 64-68.
- [7] 豆子波, 付美安. 生物倍增工艺处理工业区污水的应用 [J]. 市政技术, 2016, 34 (5): 151-153.  
DOU Zibo, FU Meian. Application of bio-doubling process in treating industrial estate sewage [J]. Municipal Engineering Technology, 2016, 34 (5): 151-153.
- [8] 吕锡武, 李丛娜, 稻森悠平. 溶解氧及活性污泥浓度对同步硝化反硝化的影响 [J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14 (1): 33-35.  
LV Xiwu, LI Congna, Yuhei Inamori. Effect of DO concentration and MLSS on simultaneous nitrification and denitrification [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2001, 14 (1): 33-35.
- [9] 万金保, 付煜, 邓冕, 等. A/O-SBBR-氧化塘-人工湿地处理猪场沼液 [J]. 工业水处理, 2017, 37 (8): 101-104.