

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.004

# 微藻光生物反应器在养猪废水处理提标改造中的应用

肖海文, 覃文翊, 翟俊, 陶光卿

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 贵州省某规模化养猪场采用干清粪工艺,废水主要来源于猪栏冲洗,COD和氮、磷浓度均较高。针对原有的生物处理组合工艺难以使出水水质达标的问题,在提标改造工程中增加了廊道式微藻光生物反应器系统。运行结果表明,改造后的“UASB+SBR+廊道式微藻光生物反应器”工艺处理效果良好,出水水质优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)以及广东、浙江、山东等地方标准,工程运行费用为2.04元/m<sup>3</sup>,出水可回用于猪栏冲洗,并可回收微藻生物质,具有良好的经济和环境效益。

**关键词:** 养猪废水; 廊道式微藻光生物反应器; 提标改造

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0023-05

## Application of Microalgae Photobioreactor in Upgrading and Reconstruction of Piggery Wastewater Treatment Process

XIAO Hai-wen, QIN Wen-yi, ZHAI Jun, TAO Guang-qing

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** A large-scale pig farm in Guizhou Province adopts dry manure process. Its wastewater is mainly from the washing of piggery, which has the characteristics of high COD, nitrogen and phosphorus. As the effluent quality of the original biological combined process is difficult to reach the discharge standard, the corridor-type microalgae photobioreactor was added in the upgrading and reconstruction project. Good treatment performance of the modified process consisting of UASB, SBR and corridor-type microalgae photobioreactors was obtained, and the effluent quality was better than the limits specified in *Discharge Standard of Pollutants for Livestock and Poultry Breeding* (GB 18596-2001) and the local standards of Guangdong, Zhejiang and Shandong provinces. The operational cost of the project was 2.04 yuan/m<sup>3</sup>. The effluent could be reused for washing the piggery, and the microalgae biomass could be recycled, which had good economic and environmental benefits.

**Key words:** piggery wastewater; corridor-type microalgae photobioreactor; upgrading and reconstruction

微藻光生物反应器是利用自然界微藻净化能力而开发的一类低成本、可持续性强的废水处理技术,其不仅能高效降低废水中的有机物以及氮、磷等营养元素,还可利用微藻固碳产生大量生物质,为废水中能源和物质的回收提供了可能,目前在国内外畜

禽养殖废水处理的研究和应用中逐渐成为热点。笔者介绍了微藻光生物反应器在贵州省某规模化养猪场废水处理提标改造工程中的应用情况,并与其他养猪废水处理工艺进行对比,分析了其能耗和运行费用,旨在为国内规模化养猪场的废水处理及其提

标改造工程设计提供一定的参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程基本情况

贵州省某养猪场生猪养殖规模为 1 万头,采用干清粪工艺,废水主要来源于对猪栏的清洗,废水处理量约为 40 m<sup>3</sup>/d。原有废水处理系统建于 2015 年,采用 UASB+SBR 生物处理工艺,但出水 COD 和氨氮浓度经常超出《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)限值,因此出水一直由清粪车运至污水厂进一步处理。2018 年该养猪场对原废水处理系统进行技术改造,主要在原有工艺基础上增加了廊道式微藻光生物反应器,并采用 MBR 技术进行微藻的固液分离和生物质回收。改造工程设计进水 COD、氨氮和 TP 浓度分别为 5 264~6 673、783~994、51.6~62.3 mg/L,设计出水水质执行 GB 18596—2001 标准,即 COD≤400 mg/L、氨氮≤80 mg/L、TP≤8 mg/L。

### 1.2 工艺流程

本项目改造后的工艺流程见图 1。废水在集粪池和固液分离机中除去大的杂质、颗粒物后,进入调节池 1 进行均质调节,再进入 UASB 反应池,借助厌氧微生物作用,使废水中的大分子有机物水解酸化为小分子有机物,出水经调节池 2 后进入好氧 SBR 反应池,以进一步降低 COD、TP、氨氮等指标浓度,减轻后续廊道式微藻光生物反应器的进水污染负荷。之后,废水经过三级串联廊道式微藻光生物反应器净化,进入 MBR 池内利用微滤膜进行固液分离,出水进入消毒池,采用次氯酸钠消毒后回用于猪栏粪便冲洗、MBR 池气水反冲洗以及 SBR 池的清洗。从 MBR 池分离出的浓缩藻液经微藻回收池回流至廊道式微藻光生物反应器以补充微藻生物量,剩余藻液排出干化消毒后可作为饲料。

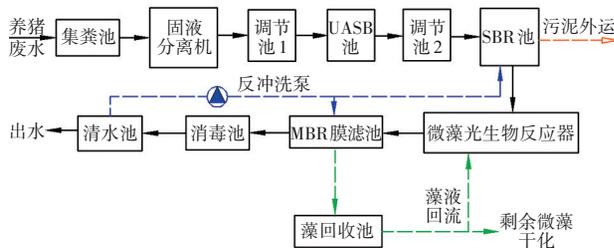


图 1 改造后的处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of modified treatment process

### 1.3 主要构筑物和设计参数

UASB 反应池为地上式钢混结构,长×宽×高=

5.0 m×3.0 m×6.5 m,水力停留时间(HRT)=45 h,水力负荷为 0.11 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。

SBR 反应池为地上式钢混结构,2 组并列运行,每组的长×宽×高=5.5 m×3 m×3.5 m,HRT=30 h。因考虑到曝气噪音会影响邻近圈舍生猪睡眠,SBR 为间歇运行,仅在每日 08:00—20:00 期间运行,其余时间闲置。每组 SBR 池每天运行 2 个周期,2 组共 4 个周期,每周期处理水量为 10 m<sup>3</sup>,单周期时长为 6 h,其中进水、反应、沉淀、出水、闲置时间分别为 0.5、3、1、0.5、1 h。

新增的廊道式微藻光生物反应器平面布置见图 2,分为 3 个串联池体,均为地上式钢混结构。反应器一出水进入反应器二,反应器二出水进入反应器三,反应器三出水进入 MBR 膜滤池。在各反应器内部,水流在推流器作用下进行类似氧化沟的内部循环流动。反应器一、二、三的占地面积分别为 698、471、546 m<sup>2</sup>。3 个串联池体中均配置 2 台功率为 1.5 kW 的推流器,光源为自然光照,夜间无专门辅助光源。每个反应器有效水深均为 0.35 m,总 HRT=15 d。由于地形平面不规则,光生物反应器廊道宽介于 3~4 m 之间,廊道沿流程总长度在 150~180 m 之间。由于采用串联方式,各级反应器进水浓度依次降低,有利于反应器内生长适应于各级进水水质的不同菌藻共生体系,间接起到了“生物选择器”的作用,可提高对目标污染物的去除效果。



图 2 廊道式微藻光生物反应器平面布置

Fig.2 Layout of corridor-type microalgae photobioreactor

MBR 膜滤池为地上式钢混结构,长×宽×高=5.0 m×4.0 m×3.5 m,采用 2 组一体化式微滤膜组件,配套 2 台产水泵和 2 台从清水池内抽水的膜组件反冲洗泵。

## 2 改造前后的运行效果分析

### 2.1 改造前的运行效果

改造前 UASB+SBR 组合工艺的进、出水水质见

表1。可知,UASB+SBR组合工艺虽然能有效降低养猪废水的污染负荷,但出水各项指标均未达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)。

表1 改造前UASB+SBR组合工艺的进、出水水质

Tab.1 Influent and effluent quality of UASB and SBR combined process before modification

项目	COD	氨氮	TP
进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	5 264~6 673	783~994	51.6~62.3
UASB出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	1 237~1 528	719~932	49.4~53.1
SBR出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	634~713	233~307	25.4~28.7
平均去除率/%	88.7	69.3	56.1

## 2.2 改造后的运行效果

本项目2019年6月改造完成后开始调试运行,9月廊道式微藻光生物反应池内的水呈现出浓绿色,无异味,镜检显示池内藻种主要为小球藻和栅藻,而非铜绿微囊藻属、水华鱼腥藻属、水华束丝藻属等产毒产嗅藻。此时,采用生物质干重法<sup>[1]</sup>测得廊道内平均生物量已达到400 mg/L(干质量)以上并逐渐保持稳定,系统开始正式运行。表2为改造后系统在2019年9月—2020年8月的进、出水水质情况。

表2 改造后处理系统的进、出水水质

Tab.2 Influent and effluent quality of modified treatment process

项目	COD	氨氮	TP
进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	5 022~6 761	732~1 015	40.2~72.1
SBR出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	604~732	216~332	22.5~31.6
出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	70~122	6~18	3.2~7.6
平均去除率/%	98.5	98.7	90.9

由表2可知,提标改造后,处理系统出水水质良好,整个系统的COD、氨氮、TP平均去除率分别达到了98.5%、98.7%和90.9%,较未改造前分别提高了9.8、29.4和34.8个百分点,出水各项指标均优于国家标准GB 18596—2001,并且出水COD和氨氮指标均值可以满足要求更高的如浙江省、山东省和广东省的地方标准,表明微藻光生物反应器是满足畜禽养殖废水处理提标改造要求的简易有效工艺。

新增廊道式微藻光生物反应器的主要运行控制参数为推流流速和推流模式。通过中试及现场调试,确定推流模式为间歇推流,即07:00—19:00开启两台推流器,流速控制在0.050~0.075 m/s,夜

间推流器则停止工作。调试数据表明,相较于连续推流,间歇推流不仅可以减少能耗,还能在一定程度上降低连续推流产生的剪切力对菌藻共生系统生长的不良影响。

廊道式微藻光生物反应器出水采用MBR膜技术进行固液分离,浓水(藻液)回流比为2%~5%,主要根据光生物反应池内的生物量浓度进行调整,夏秋季节回流比相对较小,冬春季节回流比相对较大。藻回收池每周排一次剩余浓缩藻液,每次排放量约为1~3 m<sup>3</sup>,浓度在4 000~7 500 mg/L范围。

## 2.3 季节对微藻光生物反应器的影响

微藻光生物反应器主要依靠系统内的菌藻共生体系实现对水中有机物及氮、磷的去除。因此,季节性的光照和温度变化都会对处理系统产生重要的影响。图3为微藻光生物反应器一年内逐月的污染物去除情况。可以看出,季节变化对有机物的去除有明显影响,11月—次年3月的COD去除率明显低于其他月份,这主要是由于温度降低会导致菌藻共生体系尤其是异养菌降解能力的下降。总磷去除效果在冬季也出现了明显的下降,去除率由夏秋季的85%降到冬季的80%以下。微藻光生物反应器对磷的去除主要依靠藻类、微生物的同化以及化学沉淀作用,其中以磷酸盐的化学沉淀为主<sup>[2]</sup>。冬季由于温度降低、光照减弱,微生物及藻类对磷的同化作用下降;而且,冬季光合作用导致的pH升高效应弱于光照充足的夏季,使得磷酸盐的化学沉淀作用减弱;另外,冬季微藻光生物反应器进水磷浓度增加也是去除率降低的一个重要因素,温度降低导致前面工艺的处理效果下降,故微藻光生物反应器进水浓度相较夏季有所升高。与有机物和总磷相比,氨氮去除率基本保持在95%以上,受季节影响很小,出水浓度相对稳定。菌藻共生体系中存在显著的硝化现象,冬季虽然温度降低会削弱硝化反应,但足够长的停留时间和冬季溶解氧浓度的升高依然能保证充分的硝化作用;而且夏季水温高,沉积藻类残骸的快速分解可能导致出水氨氮浓度上升,所以全年氨氮去除率并无明显波动。尽管有机物和总磷的去除受季节影响明显,去除率在冬季出现较大幅度的下降,但微藻光生物反应器出水COD、TP和氨氮浓度全年仍能够稳定达到国家标准GB 18596—2001的要求。

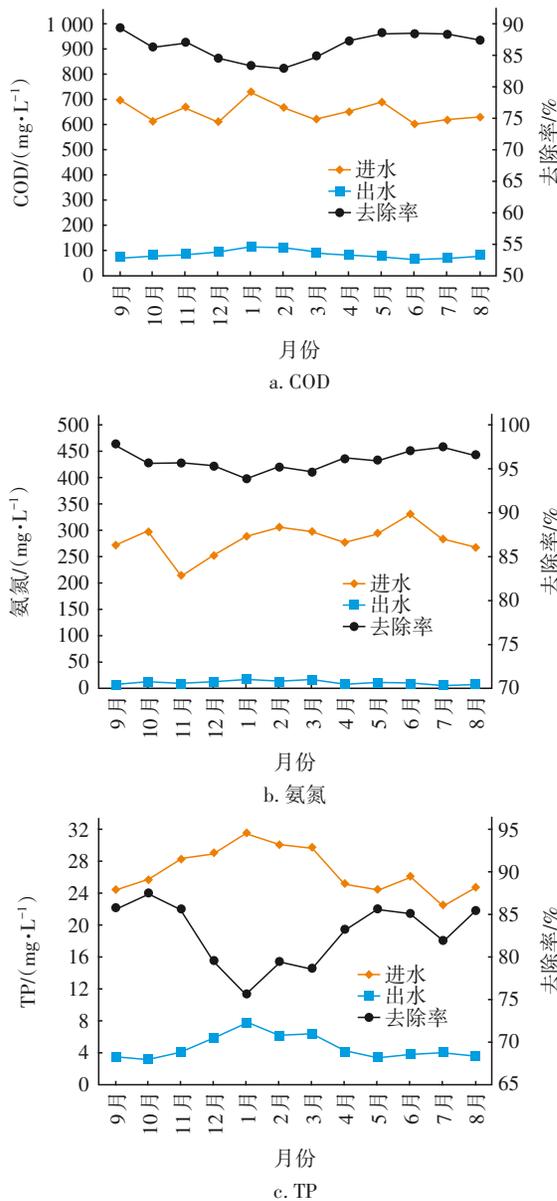


图3 微藻光生物反应器进、出水水质的变化

Fig.3 Variation of influent and effluent quality in microalgae photobioreactor

### 3 项目造价及运行成本分析

项目总投资成本为47.95万元,其中土建工程费用为31.10万元,设备购置费用为16.85万元,相应的吨水投资成本为1.20万元/m<sup>3</sup>。项目运行费用主要由药剂费、电费和人工费三部分组成。其中,药剂费包括膜组件清洗及消毒药剂费用,为0.04元/m<sup>3</sup>;电费主要由推流器、提升泵、鼓风机及固液分离机等设备的耗电产生,按全天满负荷运行,日用电量为120 kW·h,故运行电费为60元/d,相应的单位污水处理电费为1.5元/m<sup>3</sup>;人工费为0.5元/m<sup>3</sup>。

因此该项目的污水处理费用为2.04元/m<sup>3</sup>。

表3对近年来采用不同工艺的国内规模化养殖场废水处理工程实例的运行情况进行了统计。可以看出,与其他处理工艺相比,本项目在增加廊道式微藻光生物反应器后,能达到更优的处理效果;而且处理过程中产生的微藻生物质消毒干化后可回收利用,为绿色循环生物能源和生物质回收提供了可能;另外,本项目工艺的运行费用低于其他大多数工艺,说明廊道式微藻光生物反应器在畜禽养殖废水处理中具有良好的优势和推广应用前景,适用于我国畜禽养殖废水处理和提标改造工程。

表3 近年来国内养猪废水处理工程运行费用统计

Tab.3 Statistics of operating costs of domestic piggery wastewater treatment projects

项目	规模/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	运行费用/(元·m <sup>-3</sup> )	处理工艺	出水水质
本研究	40	2.04	UASB+SBR+微藻光生物反应器	COD≤122 mg/L, 氨氮≤18 mg/L, TP≤7.6 mg/L
广东省某养殖场 <sup>[1]</sup>	100	2.43	EGSB+生物接触氧化+MBR	COD≤159 mg/L, 氨氮≤58 mg/L
九江市某养殖场 <sup>[4]</sup>	100	1.82	IC+SBBR+人工湿地	COD≤300 mg/L, 氨氮≤80 mg/L
重庆市某养猪场 <sup>[5]</sup>	500	2.70	UASB+曝气吹脱+混凝+五段Bardenpho	COD≤100 mg/L, 氨氮≤25 mg/L, TP≤2 mg/L
浙江省某养猪场 <sup>[6]</sup>	100	12~16	水解酸化+UBF厌氧+SBR+气浮	COD≤100 mg/L, 氨氮≤12 mg/L, TP≤0.4 mg/L
北京某郊区养殖场 <sup>[7]</sup>	300	4.60	ABR+SBR	氨氮≤80 mg/L, TP≤8 mg/L
杭州市某养殖场 <sup>[8]</sup>	100	4.16	UASB+SBR+氧化塘	COD≤358 mg/L, 氨氮≤70 mg/L
福州市某养猪场 <sup>[9]</sup>	150	4.70	UASB+两级A/O+MBR+高级氧化	COD≤150 mg/L, 氨氮≤40 mg/L, TP≤5 mg/L
潼南华岩养猪场 <sup>[10]</sup>	425	3.54	UASB+多级A/O工艺	COD≤105 mg/L, 氨氮≤11 mg/L
江西省某养猪场 <sup>[11]</sup>	60	1.78	UASB+两级A/O+生态塘	COD≤115 mg/L, 氨氮≤20 mg/L, TP≤0.8 mg/L

### 4 结论

① 在传统生物处理工艺后增加微藻光生物反应器,可以有效提高对养猪废水中有机物、氨氮和磷的去除率,使出水水质优于《畜禽养殖业污染

物排放标准》(GB 18596—2001),适合用于畜禽养殖废水处理及提标改造工程。

② UASB+SBR+廊道式微藻光生物反应器工艺处理养猪废水的运行费用约为2.04元/m<sup>3</sup>,并能实现微藻生物质的回收利用。

③ 廊道式微藻光生物反应器采用白天间歇推流、流速为0.050~0.075 m/s的推流方式,能在保证出水水质的前提下显著降低能耗和运行成本。

#### 参考文献:

- [1] 谢冰涵,公维佳,梁恒,等. 光生物反应器对厌氧消化液的处理效能[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 14-18.  
XIE Binghan, GONG Weijia, LIANG Heng, *et al.* Treatment efficiency of anaerobic digestion effluent by photobioreactor[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 14-18 (in Chinese).
- [2] COSTA R, MEDRI W, PERDOMO C. High-rate pond for treatment of piggery wastes [J]. Water Science & Technology, 2000, 42(10/11): 357-362.
- [3] 陈威,袁书保. EGSB/生物接触氧化/MBR组合工艺处理养猪废水[J]. 中国给水排水, 2014, 30(20): 110-113.  
CHEN Wei, YUAN Shubao. EGSB/bio-contact oxidation pond/MBR combined process for piggery wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(20): 110-113 (in Chinese).
- [4] 万金保,张文燕,吴永明,等. 猪场废水脱氮处理工程实践[J]. 给水排水, 2010, 36(9): 63-65.  
WAN Jinbao, ZHANG Wenyan, WU Yongming, *et al.* Engineering application of denitrification treatment of piggery wastewater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(9): 63-65 (in Chinese).
- [5] 段跟定,张胜利. UASB—曝气吹脱—混凝—五段Bardenpho组合工艺处理养猪废水工程案例[J]. 给水排水, 2018, 44(2): 56-60.  
DUAN Gending, ZHANG Shengli. An engineering case study of piggery wastewater treatment by UASB-aeration stripping-coagulation-five stage Bardenpho combined process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(2): 56-60 (in Chinese).
- [6] 邹艳艳,梅荣武,韦彦斐. 高氨氮养猪场废水治理工程实践研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(12): 99-102.  
ZOU Yanyan, MEI Rongwu, WEI Yanfei. Study on treatment of highly concentrated ammonia-nitrogen wastewater from a hogger [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(12): 99-102 (in Chinese).
- [7] 许馨月. 北京郊区小规模养猪场废水污染调查及处理研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016: 66-68.  
XU Xinyue. Pollution Investigation and Treatment of Swine Wastewater from Small Scale Pig Farms in Beijing Suburbs [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016: 66-68 (in Chinese).
- [8] 徐著. 大中型养殖场废弃物处理沼气工程应用模式及工程实例[D]. 杭州:浙江大学, 2015: 35-40.  
XU Zhu. The Waste Biogas Technology Application in Livestock Farm and Its Engineering Examples Analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 35-40 (in Chinese).
- [9] 杨祖沐. 规模化猪场废水处理工程实例[J]. 化学工程与装备, 2018(7): 309-311.  
YANG Zumu. An engineering case study of large scale pig farm wastewater treatment [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018(7): 309-311 (in Chinese).
- [10] 吴浩楠. 基于短程同步硝化反硝化技术的养猪废水处理工程调试研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017: 56-62.  
WU Haonan. The Engineering Adjusting for Wastewater of Scale Pig Farm Treated by Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 56-62 (in Chinese).
- [11] 余晓玲,邓觅,吴永明,等. UASB—两级A/O—生态塘组合工艺处理养猪废水[J]. 给水排水, 2018, 44(3): 59-63.  
YU Xiaoling, DENG Mi, WU Yongming, *et al.* Treatment of swine wastewater by combined process of UASB-two stage A/O-ecological pond [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(3): 59-63 (in Chinese).

作者简介:肖海文(1976- ),女,四川雅安人,博士,副教授,主要从事雨水、废水的处理和资源化利用技术研究。

E-mail: xiaohaiwen99@163.com

收稿日期:2020-12-14

修回日期:2021-04-30

(编辑:刘贵春)