

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.002

养殖废水亚硝化-厌氧氨氧化处理工程示范研究

杨源, 胡真虎

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对规模化养殖场养殖废水传统脱氮处理工艺脱氮效率低、运行费用高等技术问题,文章提出养殖废水的亚硝化-厌氧氨氧化脱氮处理工艺,并开展示范工程研究。研究结果表明:亚硝化-厌氧氨氧化工艺在养殖废水处理过程中运行稳定,工艺出水中氨氮(NH_4^+-N)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、悬浮固体(suspended solids, SS)、总氮(total nitrogen, TN)的平均质量浓度分别为34、58、190、127 mg/L,平均去除率分别为82.5%、81.7%、91.6%、58.3%,出水水质满足《畜禽养殖业污染物排放标准》GB 18596—2001的要求。该工艺的废水处理总成本为2.83元/ m^3 ,与其他的生物处理工艺相比节约了30.0%~91.8%,表明亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理奶牛场养殖废水具有良好的可行性及应用价值。

关键词:养殖废水;亚硝化;厌氧氨氧化;脱氮

中图分类号:X713

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)02-0151-05

Demonstration study on the treatment of livestock wastewater by partial nitrification-Anammox

YANG Yuan, HU Zhenhu

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the technical problems of low nitrogen removal efficiency and high operating costs of traditional nitrogen removal treatment processes for the livestock wastewater from large-scale livestock and poultry farms, this paper proposes partial nitrification-Anammox denitrification process for the livestock wastewater, and a demonstration project study was conducted. The research results of the demonstration project indicate that partial nitrification-Anammox process can operate stably in the treatment of the livestock wastewater, the average mass concentrations of ammonia nitrogen(NH_4^+-N), chemical oxygen demand(COD), suspended solids(SS), and total nitrogen(TN) in the process effluent are 34, 58, 190, and 127 mg/L, respectively, and the average removal rates are 82.5%, 81.7%, 91.6%, and 58.3%, respectively, the effluent quality meets the requirements of the Discharge Standard of Pollutants for Livestock and Poultry Breeding(GB 18596—2001). The total cost of wastewater treatment in this process is 2.83 yuan/ m^3 , which saves 30.0%-91.8% compared to other biological treatment processes. This indicates that partial nitrification-Anammox process for treating the livestock wastewater from dairy farms has good feasibility and application value.

Key words: livestock wastewater; partial nitrification; Anammox; nitrogen removal

规模化的养殖会产生大量的养殖废水,这些养殖废水中含有高质量浓度的污染物。根据《第

二次全国污染源普查公报》统计结果显示,规模化畜禽养殖场水污染物中化学需氧量(chemical ox-

收稿日期:2023-03-29;修回日期:2023-04-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC0408502);安徽省科技重大专项资助项目(18030801102)

作者简介:杨源(1997—),男,安徽宣城人,合肥工业大学硕士生;

胡真虎(1971—),男,安徽六安人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:zhhu@hfut.edu.cn.

xygen demand, COD) 排放量为 6.05×10^6 t、总氮 (total nitrogen, TN) 排放量为 3.70×10^5 t、总磷 (total phosphorus, TP) 排放量为 8.04×10^4 t, 分别占畜禽养殖业总排放量的 60.5%、62.0%、67.2%, 畜禽养殖污染物排放量占整个农业源的 60.0% 左右, 占全国水污染排放量的 20.0% 左右^[1-2]。这些养殖废水首先会考虑农用, 但由于养殖场周围的农田有限, 不能消纳全部的养殖废水^[3], 因此会有部分养殖废水需要处理达到排放标准才能排放。厌氧消化被广泛应用在养殖废弃物的处理中^[4]。厌氧消化可以有效降低养殖废水中有机物的含量, 但无法降低废水中氨氮 (NH_4^+-N) 的质量浓度^[5], 并且在厌氧消化过程中会释放出更多的 NH_4^+-N , 使 NH_4^+-N 质量浓度达 2 000 mg/L 左右^[6], 高质量浓度的 NH_4^+-N 是造成水体污染的重要原因^[7]。

传统的生物脱氮技术通常是通过硝化和反硝化来进行的, 首先通过曝气在氨氧化菌的作用下将 NH_4^+-N 氧化转化为亚硝态氮 (NO_2^--N), 接着 NO_2^--N 在亚硝酸盐氧化菌的作用下转化为硝态氮 (NO_3^--N), 最后 NO_3^--N 在反硝化细菌的作用下还原为 N_2 ^[8]。在这个过程中需要大量的曝气和碳源。

养殖业是一种低盈利行业, 且养殖废水 NH_4^+-N 质量浓度较高, 因此, 亟需一种高效节能的污水脱氮技术来处理规模化养殖废水^[9]。厌氧氨氧化是一种新型自养生物脱氮技术, 在厌氧条件下, 厌氧氨氧化菌以 NO_2^--N 为电子受体, NH_4^+-N 为电子供体, 将 NO_2^--N 和 NH_4^+-N 同时转化为 N_2 以达到脱氮的目的^[10]。与传统的生物脱氮技术相比, 厌氧氨氧化脱氮技术改变了原有的脱氮途径, 节约了 60% 的曝气和 100% 的碳源, 降低了污泥产量和一氧化二氮排放^[11-12]。近年来, 有研究人员采用厌氧氨氧化脱氮技术对养殖废水的处理进行了实验室研究^[13], 结果表明该技术对 NH_4^+-N 和 TN 的平均去除率可分别高达 93.8%、87.1%。然而目前厌氧氨氧化技术在养殖废水处理方面的实际应用研究较少。

本文介绍了以亚硝化-厌氧氨氧化为主要工艺的奶牛场养殖废水处理示范工程, 探究了该工艺对养殖废水中 NH_4^+-N 、COD、悬浮固体 (suspended solids, SS) 和 TN 的去除效果, 分析其用于养殖废水处理中的经济效益与应用价值, 为养殖废水的处理提供了新的思路和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 养殖废水特征

该奶牛场养殖废水主要来源于畜禽尿液、粪便, 冲洗水及生活污水等。经过厌氧塘厌氧消化处理后, 其水质指标见表 1 所列。

表 1 安徽省某奶牛场养殖废水水质情况 单位: mg/L

指标	NH_4^+-N	COD	SS	TP
质量浓度	1 000~	3 000~	2 500~	20~90
	2 000	5 000	5 000	

1.2 示范工程的建立与运行

该养殖废水处理示范工程位于安徽省某奶牛场内, 现存奶牛 500 余头, 每日产生的养殖废水量为 40~60 m^3 。该示范工程处理奶牛场养殖废水工艺流程如图 1 所示。

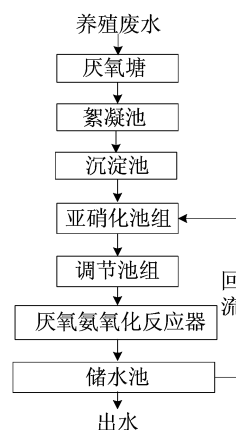


图 1 示范工程处理工艺流程

奶牛场养殖废水首先储存在厌氧塘中, 经过长时间的厌氧消化作用, 去除大部分 COD, 然后经过机械絮凝池以降低废水中的 SS 质量浓度, 出水至沉淀池, 沉淀池出水进入亚硝化池组, 亚硝化池组采用序批式活性污泥法 (sequencing batch reactor activated sludge process, SBR), 将 NH_4^+-N 氧化为 NO_2^--N 。SBR 池组出水进入调节池组, 经过调节该池组中 NH_4^+-N 与 NO_2^--N 的质量浓度比例之后进入厌氧氨氧化反应器, 厌氧氨氧化反应器是一种升流式厌氧污泥床 (up-flow anaerobic sludge bed, UASB), 在厌氧氨氧化菌的作用下进行脱氮反应, 最后出水溢流至储存池。为了进行高效脱氮, 同时防止系统运行效果出现问题, 将储水池中的水部分回流至亚硝化池组, 回流比为 1:5。

1.3 分析方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、COD、SS、TN、TP 的质量浓度测定方法均参照标准分析方法^[14]。

2 结果与讨论

2.1 絮凝沉淀预处理中 SS 去除效果分析

为了有效去除养殖废水中的 SS,采用联合絮凝和微曝气的方式处理养殖废水,并检测絮凝前后的 SS 质量浓度,相关 SS 质量浓度及其去除率如图 2 所示。

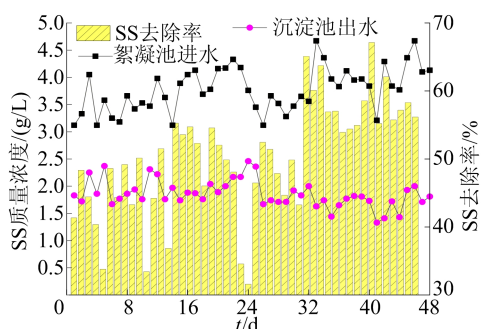


图 2 絮凝沉淀池内 SS 质量浓度及其去除率

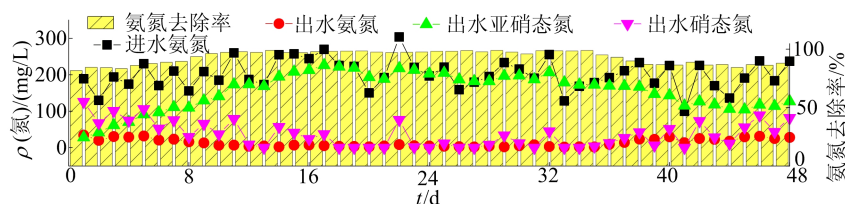
从图 2 可以看出,1~32 d,聚丙烯酰胺 (polyacrylamide, PAM) 与聚合氯化铝 (polyaluminum chloride, PAC) 联合絮凝对 SS 的平均去除率为 46.2%,出水的 SS 平均质量浓度为 2.1 g/L,不能满足后续的生物处理要求。为进一步提高 SS

去除率,33~48 d 在絮凝的过程中进行微曝气处理。结果表明,SS 平均去除率为 58.5%,相比于第 1 阶段,提高了近 12.0%,说明絮凝联合微曝气处理能促进 SS 的去除。经过絮凝联合微曝气处理,出水的 SS 质量浓度基本稳定在 1.5 g/L 左右,此过程去除了大部分无机悬浮物,剩余悬浮物主要为有机大分子污染物,可通过后续生物氧化去除^[15]。

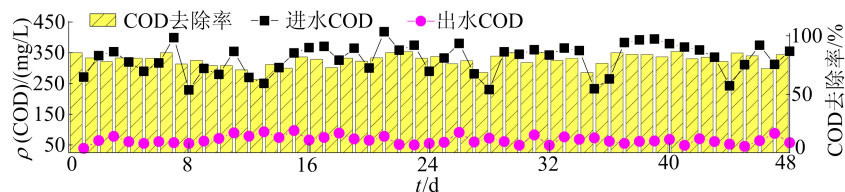
2.2 亚硝化工艺处理效果分析

SBR 池组中氮、COD、SS 质量浓度变化及相应去除率变化情况如图 3 所示。

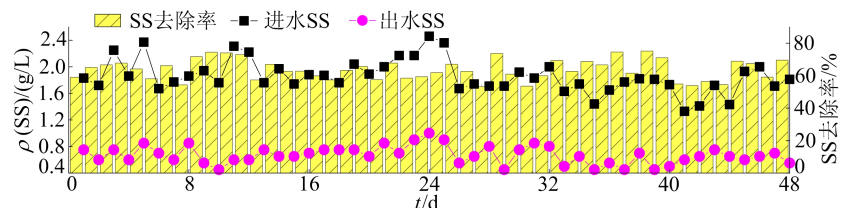
从图 3 可以看出,由于生物氧化的作用,亚硝化过程会对 SS 和 COD 有一定的去除效果。SBR 池组进水和出水中 COD 的平均质量浓度分别为 330、66 mg/L, COD 的平均去除率为 79.5%,这主要是由于间歇曝气阶段微生物会氧化分解大部分的有机物。SBR 池组进水和出水中 SS 平均质量浓度分别为 1.86、0.67 g/L, SS 的平均去除率为 63.7%,是由于 SS 因曝气而分解。SBR 池组进水中 NH_4^+-N 的平均质量浓度为 200 mg/L,经过亚硝化过程后出水中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 的平均质量浓度分别为 13、156、31 mg/L, NH_4^+-N 的平均去除率高达 93.1%,其中 NH_4^+-N 大部分转化为 NO_2^--N ,但仍有小部分转化为 NO_3^--N ,产物 NO_2^--N 作为后续厌氧氨氧化反应的底物。



(a) 氮质量浓度及氨氮去除率



(b) COD 质量浓度及其去除率



(c) SS 质量浓度及其去除率

图 3 SBR 池组中氮、COD、SS 质量浓度变化及相应去除率

2.3 厌氧氨氧化工艺处理效果分析

UASB中氮、COD、SS质量浓度变化及相应去除率变化情况如图4所示。

从图4可以看出,UASB进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN的平均质量浓度分别为123、156、315 mg/L,经过厌氧氨氧化工艺过程后,UASB出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN的平均质量浓度分别为34、29、127 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的平均去除率分别为72.5%、58.3%,经过计算得出反应去除的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的摩尔比保持在1.11~1.87之间,基本符合厌氧氨氧化反应的氮元素转化规律,UASB中厌氧氨氧化效果较为稳定,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度基本满足《畜禽养殖

业污染物排放标准》GB 18596—2001的要求。UASB进水与出水中COD的平均质量浓度分别为65、58 mg/L,厌氧氨氧化工艺过程消耗了部分COD,但由于厌氧氨氧化菌为自养微生物,说明此工艺过程中还存在一定的反硝化作用,利用进水中部分可生物降解的有机物将部分硝态氮还原成氮气与亚硝态氮。UASB出水中COD的平均质量浓度满足《畜禽养殖业污染物排放标准》GB 18596—2001的要求。UASB进水和出水中SS的平均质量浓度分别为1.10、0.19 g/L,SS的平均去除率为68.6%,出水SS质量浓度基本满足《畜禽养殖业污染物排放标准》GB 18596—2001的要求。

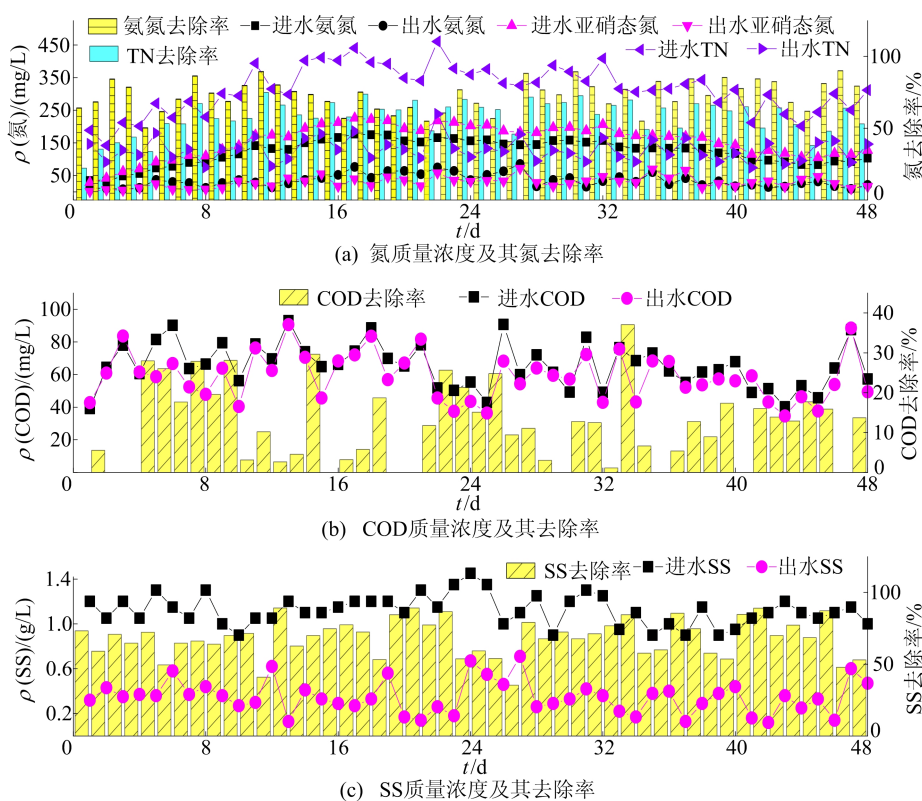


图4 UASB中氮、COD、SS质量浓度变化及相应去除率

2.4 亚硝化厌氧氨氧化工艺经济效益分析

本工艺的运行成本主要由药剂费和能耗费用组成。本工艺处理能力为 $50\text{ m}^3/\text{d}$,废水处理过程中涉及药剂投加的工艺主要是絮凝沉淀预处理过程,采用PAC和PAM联合作用进行絮凝,其投加量分别为 0.75 、 $0.05\text{ kg}/\text{m}^3$,其单价分别为 2.00 、 $14.40\text{ 元}/\text{kg}$ 。由此可知,养殖废水处理的药剂成本为 $2.22\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

废水处理过程的能耗费用主要来源于仪器、仪表、设备的工作运行。该工艺中涉及的仪器设

备及能耗见表2所列。根据各仪器设备能耗计算出本工艺每天处理废水总能耗为 $54.63\text{ kW}\cdot\text{h}$,按当地现行电价 $0.56\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,每天耗电费用为 30.60 元 ,即处理每吨废水的能耗成本为 $0.61\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

综上分析可知,本工艺的废水处理总成本为 $2.83\text{ 元}/\text{m}^3$ 。文献[16-17]中报道的养殖废水的处理成本变化范围非常大,其中采用生物法的治疗成本也达到 $4.03\sim 34.70\text{ 元}/\text{m}^3$ 。相较而言,本示范工程采用的养殖废水处理工艺的处理成本

节约了30.0%~91.8%,具有良好的经济可行性与经济效益。

表2 废水处理的主要仪器设备及能耗分析

序号	设备名称	数量	功率/ kW	每日用 时/h	用电量/ (kW·h)
1	计量泵	1	0.03	6.00	0.15
2	潜水搅拌机	2	0.85	3.00	5.10
3	框式搅拌机	3	0.50	3.00	4.50
4	取水泵	1	0.50	6.00	3.00
5	风机	2	5.50	1.80	19.80
6	管道泵 1	2	4.00	0.10	0.80
7	管道泵 2	2	0.50	12.00	12.00
8	管道泵 3	1	0.50	5.30	3.18
9	搅拌机	1	0.75	0.50	0.38
10	排泥泵	1	1.10	0.02	0.02
11	溶解氧传感器	2	0.02	24.00	0.96
12	pH 传感器	2	0.02	24.00	0.96
13	温度传感器	2	0.02	24.00	0.96
14	液位计	3	0.02	24.00	1.44
15	大塘取水泵	1	0.75	0.80	0.60
16	滤池取水泵	1	0.75	0.80	0.60
17	电动蝶阀	2	0.03	3.00	0.18

3 结 论

本示范工程以亚硝化厌氧氨氧化工艺为主要处理工艺,对奶牛场养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、SS、TN 等污染物的去除均具有显著效果,工艺出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、SS、TN 的平均质量浓度分别为 34、58、190、127 mg/L,平均去除率分别为 82.5%、81.7%、91.6%、58.3%,出水水质满足《畜禽养殖业污染物排放标准》GB 18596—2001 的要求。工艺的废水处理总成本为 2.83 元/m³,与其他的生物处理工艺相比较节约了 30.0%~91.8%,具有良好的经济可行性与经济效益。综上所述,亚硝化-厌氧氨氧化工艺在处理奶牛场养殖废水中具有良好的可行性及应用价值。

[参 考 文 献]

[1] 生态环境部国家统计局农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. [2022-12-10]. <https://www.gov.cn/>

xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm.

[2] 张学斌. 畜禽养殖废水处理技术应用分析[J]. 畜禽业, 2022, 33(4): 56-58.

[3] 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.

[4] 赵晨菊,余薇薇,喻涛,等. 微量元素强化厌氧发酵技术处理畜禽废水进展研究[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 1107-1112.

[5] 叶韬,颜成,王电站,等. 规模化猪场粪污废水生物聚沉氧化新工艺及其生产性实验效果研究[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2521-2529.

[6] 严佳凡. 上海天马大型湿垃圾厌氧消化沼液处理工程运行[J]. 广东化工, 2022, 49(11): 164-166, 145.

[7] 熊志乾,李奇蔚,贝学友,等. 养殖废水处理现状与未来发展趋势[J]. 清洗世界, 2023, 39(2): 59-61.

[8] 郑春霞,王侧容,张漫漫,等. 反硝化聚磷菌及其脱氮除磷机理研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(3): 1009-1025.

[9] 刘晓,张学博,陈大明,等. 2022 年合成生物学发展态势[J]. 生命科学, 2023, 35(1): 63-71.

[10] 薛意,陈荣,邢保山,等. 厌氧氨氧化:理论和工艺发展概述(代序言)[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 375-380.

[11] 陈珺,王洪臣,BERNHARD W. 城市污水处理工艺迈向主流厌氧氨氧化的挑战与展望[J]. 给水排水, 2015, 51(10): 29-34.

[12] LI X, HUANG Y, YUAN Y, et al. Startup and operating characteristics of an external air-lift reflux partial nitritation-Anammox integrative reactor[J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 657-665.

[13] 吴浩楠,张智,廖建华,等. 多级 A/O 工艺短程 SND 处理养猪沼液的工程调试[J]. 中国给水排水, 2017, 33(13): 35-39, 45.

[14] ORRIS A. Changes in the biochemical oxygen demand procedure in the 21st edition of standard methods for the examination of water and wastewater[J]. Water Environment Research, 2007, 79(4): 453-456.

[15] 郭云红,叶正芳,赵泉林. 絮凝沉淀固定化微生物组合工艺处理炼油厂含硫废水和催化剂废水[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 749-754.

[16] 王永磊,刘杰,韩延镇,等. 畜禽养殖废水处理工艺分析研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(8): 41-46.

[17] 刘光石,任美泽,李登. 厌氧+SBR+A/O+MBR 工艺处理养殖废水[J]. 中国给水排水, 2022, 38(20): 116-119.

(责任编辑 吴亮)