农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

畜禽养殖废水处理技术动态与发展趋势

张静妮， 韩志刚， 郑丹， 王文国， 邓良伟

引用本文:
张静妮, 韩志刚, 郑丹, 等. 畜禽养殖废水处理技术动态与发展趋势[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2320-2329.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1102

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

养殖废水处理理论与实践进展
廖新俤
农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2317-2319 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1133

畜禽粪污清洁堆肥——机遇与挑战
焦敏娜, 任秀娜, 何熠锋, 王权, 李荣华, 李季, 张增强
农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2361-2371 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1138

养殖废水处理设施自动化智能化运营与管控
冯文谦, 史金才, 练植婵, 廖劲松, 廖新俤
农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2355-2360 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1153

三类抗生素在两种典型猪场废水处理工艺中的去除效果
周婧, 支苏丽, 宫祥静, 杨凤霞, 谷艳茹, 丁飞飞, 张克强
农业环境科学学报. 2019, 38(2): 430-438 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1092

畜禽粪污处理处置中危险生物因子赋存与控制研究进展
张俊亚, 隋倩雯, 魏源送
农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2342-2354 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1132

关注微信公众号，获得更多资讯信息

张静妮, 韩志刚, 郑丹, 等. 畜禽养殖废水处理技术动态与发展趋势[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2320-2329.
ZHANG J N, HAN Z G, ZHENG D, et al. Technical status and trends in animal wastewater treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2320-2329.

开放科学 OSID

畜禽养殖废水处理技术动态与发展趋势

张静妮[1], 韩志刚[2], 郑丹[1], 王文国[1], 邓良伟[1*]

(1.农业农村部沼气科学研究所, 成都 610041; 2.福州共创环保技术有限公司, 福州 350003)

摘　要: 近年来,畜禽养殖粪污的处理利用已经成为社会各界关注的焦点。本文着重从工程应用的角度,分析了预处理、厌氧处理、沼液利用、沼液自然处理、好氧处理、厌氧-好氧组合处理、深度处理等工艺单元的技术研究与应用现状,并从沼气利用与温室气体减排、总氮控制和智能化信息技术应用等方面,展望了畜禽养殖废水处理利用的发展趋势。

关键词: 畜禽养殖废水;厌氧处理;好氧处理;深度处理;资源化利用;应用现状

中图分类号: X713　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2021)11-2320-10　　doi:10.11654/jaes.2021-1102

Technical status and trends in animal wastewater treatment

ZHANG Jingni[1], HAN Zhigang[2], ZHENG Dan[1], WANG Wenguo[1], DENG Liangwei[1*]

(1. Biogas Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China; 2. Fuzhou Gong Chuang Environmental Technology Co. Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: In recent years, the treatment and utilization of animal manure and wastewater has attracted attention from all sectors of society. Focusing on engineering applications, this study reviews current research and application status of the technology in processing units, including pre-treatment, anaerobic treatment, utilization of digested effluent, natural treatment of digested effluent, aerobic treatment, combined anaerobic-aerobic treatment, and advanced treatment. The development trend of treatment and utilization of animal wastewater was prospected from the following aspects, such as biogas utilization and greenhouse gas emission reduction, total nitrogen removal and the application of intelligent information technology.

Keywords: animal wastewater; anaerobic treatment; aerobic treatment; advanced treatment; resource utilization; application status

规模畜禽养殖在为人们提供丰富的肉、蛋、奶等营养食品的同时,也在部分地区造成了粪尿、污水的过度集中,给周边环境带来了较大压力。近年来,畜禽粪污的处理与利用已经成为社会各界关注的焦点。为此,国家发布了一系列政策,支持和推动粪污的处理利用,在畜禽养殖污染的源头减量、过程控制、末端利用等方面形成了较为系统的政策体系和处理利用模式。同时,大学、科研机构和环保公司的科研人员、工程师以及养殖场的运行管理人员围绕畜禽粪污、特别是畜禽养殖废水的处理利用展开了一系列探索与应用,并取得显著的进步,也积累了丰富的经验。本文着重从工程应用的角度,分析了预处理、厌氧处理、沼液利用、沼液自然处理、好氧处理、厌氧-好氧组合处理、深度处理等工艺单元的技术研究与应用现状,并对以后的发展趋势进行了展望。

收稿日期: 2021-09-24　　**录用日期:** 2021-10-14

作者简介: 张静妮(1998—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为农业废弃物处理与利用。E-mail:1327727393@qq.com

***通信作者:** 邓良伟　E-mail:dengliangwei@caas.cn

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系

Project supported: China Agriculture Research System of MOF and MARA

1 处理技术应用现状

1.1 预处理

畜禽养殖废水在进入生化处理之前的工艺单元统称为预处理。预处理包括除杂、均质和固液分离等。除杂主要是清除废水中较大的漂浮物和悬浮物,以免影响后续处理单元的处理效果和设备的正常运行,常见的除杂措施为格栅,栅条间隙一般为15~30 mm。均质的目的是均化废水水质水量,避免水质水量波动对后续处理单元造成冲击和影响,常见的均质措施是在集水池之后、主体工艺之前设置调节池。固液分离是最主要的预处理单元,通常采用物理方法将固体部分与液体部分分离,常用的固液分离方法有沉降分离与机械分离。

沉降分离是利用重力作用使废水中不溶性固体颗粒分离,沉淀时间、废水浓度、混凝剂的选择与用量都会影响沉淀性能。化学需氧量(COD)为4 788~11 439 mg·L^{-1}的猪场废水,沉淀3 h,COD、五日生化需氧量(BOD_5)、悬浮固体(SS)、总磷(TP)、总氮(TN)的去除率分别为47.1%~59.3%、51.2%~64.4%、85.8%~89.7%、57.7%~73.4%、28.1%~36.7%。添加絮凝剂后,COD、SS、TN、TP的去除率可分别提高7.4~12.4、3.9~13.3、5.3~17.5、2.2~33.2个百分点[1]。目前,沉降分离主要用于养殖废水浓稀分离[2-4]。

机械分离可分为筛分、离心分离和压滤三大类。筛分是利用筛孔进行固液分离,去除率取决于筛孔的大小。常用的筛分设备有水力筛和振动筛,振动筛较水力筛效率更高,也不易堵塞筛孔,但工作噪声大,零部件也更易损坏。离心分离是在离心力作用下,固体颗粒与周围液体之间形成密度差异而使固液达到分离,其速度快、效率高,且分离后的粪渣含水率较低,但需消耗大量电能,能耗高、投资大。压滤分离的脱水率较筛分和离心分离更高,根据工作原理,压滤分离机分为带式压滤机、板框压滤机和螺旋挤压分离机等。工程上,猪场废水通常采用水力筛和振动筛进行固液分离,但也有采用板框压滤机进行固液分离。螺旋挤压分离机常用于牛场废水固液分离,要求进料总固体(TS)浓度大于3%。林代炎等[5-6]对4种分离机械分离猪场废水(COD约17 000 mg·L^{-1})的效果进行了对比研究,结果表明板框压滤机与离心分离机处理能力比较低,斜板筛挤压机处理能力最高,振动筛挤压机次之,这两者的处理能力是板框压滤机与离心分离机的3~5倍。板框压滤机与离心分离机的单位废水处理电耗较高,是斜板筛(水力筛)挤压机和振动筛挤压机的4~5倍。板框压滤机对污染物去除效果最好,TS、COD和BOD_5的去除率分别为86.3%、85.5%和81.3%,但是投资和占地比较大。离心机内衬滤布,对粪污的TS、COD和BOD_5的去除率分别为73.5%、72.4%和66.9%,劳动强度较大。斜板筛挤压机对TS、COD和BOD_5的去除率分别为49.7%、48.8%和38.6%,挤压后其粪渣含水率偏高。振动筛挤压机对TS、COD和BOD_5的去除率分别达62.6%、61.2%和57.5%,分离出的粪渣含水率为53.2%。也有研究表明,在猪场废水浓度较低(COD 5 692 mg·L^{-1})的情况下,斜板筛对COD、SS的去除率只有10%[4]。在一些养殖废水处理工程中,废水经过水力筛固液分离后,再经过叠螺脱水机进一步固液分离,此过程需要加絮凝剂,结果分离出的粪渣含水率较高,在85%左右。

1.2 厌氧处理

畜禽养殖废水有机物浓度高,因此通常采用厌氧消化(也称沼气发酵)工艺进行处理,采用该方法既能去除有机污染物,又能产生清洁能源——沼气。几乎所有厌氧消化工艺,包括传统消化工艺(如地下水压式沼气池、净化沼气池、黑膜沼气池)和高效的厌氧反应器(如完全混合式厌氧反应器、厌氧滤池、厌氧挡板反应器、厌氧复合反应器、上流式厌氧污泥床、内循环厌氧反应器)在畜禽养殖废水处理利用中都有应用。

在我国,上流式厌氧污泥床(UASB)、升流式固体反应器(USR)被广泛应用于养殖废水厌氧处理。由于畜禽养殖废水含有高浓度的悬浮物和氨氮,影响了UASB高效率的发挥。因为没有搅拌,UASB、USR底部容易形成沉渣,影响进料,甚至造成整个装置不能进料;UASB顶部也容易形成浮渣,堵塞UASB三相分离器和导气管,导致产生的沼气得不到很好地收集与利用。

近年来,黑膜沼气池在我国南方地区大面积应用。黑膜沼气池在常温下运行,有机物降解速度随季节、温度变化而变化,在温度低的季节和地区,有机物转化速率低、容积产气率低、占地面积大。因为废水中固态物质容易下沉聚集,所以黑膜沼气池主要用于处理浓度比较低的冲洗污水,污水进入系统之前需要进行良好的固液分离。黑膜沼气池的最大优点是初期造价低,建造1 m^3的黑膜沼气池造价在40~60元之间。另外一个优点是其能利用地热保温。但是,黑膜寿命短,3~5 a就需要更换维修,因此总造价并不低。黑膜沼气池出渣困难,需要定期清塘,清理费用高。

其底部膜破损会污染地下水，顶膜破损泄漏沼气，故存在较大安全隐患。

厌氧消化工艺种类较多，究竟哪种工艺处理畜禽养殖废水的效果更好？一些研究者在相同温度和相同进水条件下，对比研究了厌氧复合反应器（UBF）、上流式厌氧污泥床（UASB）和上折流厌氧反应器（APBR）处理猪场废水的效果，结果发现，不同工艺的处理性能差异不明显，温度对处理性能的影响更大。在10 ℃条件下，容积沼气产率为0.32~0.51 $L\cdot L^{-1}\cdot d^{-1}$，COD去除率为82.2%~91.0%；在15 ℃下，容积产气率为0.57~0.59 $L\cdot L^{-1}\cdot d^{-1}$，COD去除率为91.6%~91.9%；在25 ℃下，容积产气率为1.93~2.01 $L\cdot L^{-1}\cdot d^{-1}$，COD去除率为90.7%~90.8%[7]。在温度35 ℃、有机负荷（以TS计）8 $g\cdot L^{-1}\cdot d^{-1}$条件下，YANG等[8]又对厌氧序批式反应器（ASBR）、厌氧复合反应器（UBF）、升流式固体厌氧反应器（USR）处理猪场废水的效果进行了对比研究，结果显示，ASBR、UBF和USR的容积沼气产气率分别为2.503、2.447、1.916 $L\cdot L^{-1}\cdot d^{-1}$，COD去除率分别为78.1%、79.2%、67.6%。试验结果也说明，不同工艺之间的差异较小[9]。关于温度对猪场废水厌氧消化产气效率的影响，杨红男等[10]进行了比较系统的研究，获得了10、15、20、25、30 ℃和35 ℃条件下猪场废水厌氧消化最大容积产沼气率分别为0.071、0.271、1.173、1.948、2.196、2.871 $L\cdot L^{-1}\cdot d^{-1}$，15 ℃的容积产气率是10 ℃的3.8倍，20 ℃是15 ℃的4.32倍，而25 ℃比20 ℃、30 ℃比25 ℃、35 ℃比30 ℃分别只增加了66.0%、12.7%、30.7%，说明在猪场废水厌氧消化中，20 ℃是一个转折点。提高处理效率与产气效率的关键是提升厌氧消化温度，而最经济的提升温度的热源是沼气发电余热。由于猪场废水浓度较低，产生的沼气量以及发电余热量较小，因此利用发电余热只能提高废水温度约6 ℃[2,11]。我国绝大部分地区冬季气温低于5 ℃，利用发电余热升温只能将废水温度提升到10 ℃左右，因此厌氧消化的效率仍然很低。针对这一问题，邓良伟团队开发了浓稀分流－浓污水加热沼气发酵工艺[2,11-12]、分步加热－沼气发酵工艺[13]。通过浓稀分流可以将猪场废水分离为浓污水和稀污水，浓污水体积只占总污水体积的20%左右，却含有约70%的产沼气有机物，利用发电余热加热浓污水，可以将浓污水温度提高30 ℃左右，浓污水厌氧消化出水再与稀污水混合，在不考虑散热情况下，仍然能使稀污水温度升高约6 ℃，从而可使70%以上的沼气正常产出[11,13]。在寒冷地区或在冬季，浓稀分流、分步加热工艺能显著提升畜禽养殖废水处理效率与产沼气效率，这两个工艺在实际工程中得到了成功应用。例如河北裕丰京安养殖有限公司2 MW沼气发电工程，该工程采用浓稀分流－重点增温的沼气发酵工艺处理猪场废水，与采用传统发酵模式的其他猪场废水处理工程相比，容积产气率提升了50%，同时节省了41%的增温能耗[14]。

畜禽养殖废水中氮含量很高，这会引起工艺条件的不稳定，包括中间产物的积累和发泡及甲烷产量的降低。研究者们对此也提出了一些解决方法，如添加微生物或者无机添加剂进行强化，加速消化并稳定沼气的生产，如添加沸石与微量元素可以减轻氨的抑制作用；也可通过加热或者化学预处理的方法提高猪场废弃物的甲烷产量，如在170 ℃下对猪粪进行预处理，结果表明热处理使厌氧消化过程的甲烷产率提高了35%；也有将畜禽养殖废水与其他含氮量较少的材料进行共消化，共消化的甲烷产量更高，运行也更稳定，但该方法常因无法获得足够数量的富含碳有机物，而存在一定的局限性[15-16]。

1.3 沼液利用

沼渣沼液是畜禽养殖废水中的有机物经过厌氧消化后的发酵残留物，因所含沼渣较少且粒度较细，故一般称为厌氧消化液，俗称沼液。沼液兼具废水和液体肥料的属性，其养分主要包括发酵过程中产生的有机、无机盐类，如铵盐、钾盐、磷酸盐等可溶性物质[17]，其也富含氨基酸[18]、植物激素[19-20]、有机酸[21]等植物生理活性物质，因此，沼液具有较高的利用价值。但是，要使沼液有效地还田利用，需要解决好以下几个问题。

（1）土地承载力。粪肥、沼液适度还田利用有利于培肥地力、改善土壤结构、增加作物产量、提高农产品质量，过度施用则会导致农田土壤及水体污染。因此，沼液还田利用前需要评估养殖场附近土地的承载力。为了保护地下水和地表水不受硝酸盐污染，欧盟《硝酸盐法案》[The Nitrate Directive（91/676/EEC）]规定农田氮的输入量最大为170 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$，并且禁止在冬季施用。农业农村部于2018年专门发布了《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》（农牧办[2018]1号），按照该技术指南测算，大约每头猪当量的粪污/沼液需要0.027~0.033 hm^2的土地消纳。上海市地方标准《畜禽粪便生态还田技术规范》（DB31/T 1137—2019）规定了粪肥施用量：粮食作物，猪场液肥178.5 $t\cdot hm^{-2}$、奶牛场液肥322.5 $t\cdot hm^{-2}$；蔬菜瓜果作物，猪场液

肥535.5 t·hm^{-2}、奶牛场液肥322.5 t·hm^{-2};林木作物,猪场液肥267.0 t·hm^{-2}、奶牛场液肥322.5 t·hm^{-2}。单次最大施用量不超过105 t·hm^{-2},同一地块液肥施用时间间隔不低于7 d。

(2)沼液储存。储存期不得低于配套农田作物生产用肥最大间隔期和冬季封冻期或预计最长降雨期,储存时间不宜小于90 d。

(3)沼液输送。目前主要采用管网输送和罐车输送。管网输送一次性投资较大,为9 000~15 000元·hm^{-2},管网维护管理费7~8元·t^{-1}。罐车输送一次性投资较低,但是运行费用较高,运输及施用费大约30元·t^{-1}[22]。

(4)还田利用标准。按照《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)和《沼肥施用技术规范》(NY/T 2065—2011),沼液还田利用应执行《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)。但是许多地方要求执行《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),甚至是《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)与《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)的最严值,这就需要对沼液进行好氧处理和加药剂深度处理。加入很多药剂以后,盐分增加,处理水是否还适合还田成为不可忽视的问题。

(5)施用的方便性。在农村劳动力缺乏情况下,农户自己运输沼液并施用到地里的方式已经很难实现。目前一般通过管网或罐车将沼液输送到农田边,农户再施用到地里,或者由第三方服务主体直接将沼液运输并施用到地里。

1.4 沼液自然处理

畜禽养殖废水经厌氧处理之后产生的沼液,应优先考虑还田利用,剩余的沼液应进行达标处理后再排放。达标处理应首先考虑运行管理简单的自然处理法。自然处理法主要有稳定塘、人工湿地和砂滤池三大类。关于稳定塘、人工湿地和砂滤池处理畜禽养殖废水或其厌氧消化液,已经有许多研究[23]。这些研究主要考察了污染物的去除效果以及提升效果的改进技术。美国墨西哥湾项目[the Gulf of Mexico Program (GMP)]调查了68处总共135个中试和生产规模的湿地处理系统,收集了大约1 300个运行数据,建立了养殖废水湿地处理数据库,调查结果表明:在平均水力负荷为5.0 cm·d^{-1}条件下,人工湿地对奶牛场废水BOD_5、总悬浮固体(TSS)、氨氮(NH_3-N)、TN的平均去除率为68%、47%、60%和51%;在平均水力负荷为5.5 cm·d^{-1}下,人工湿地对猪场废水BOD_5、TSS、NH_3-N、TN的平均去除率为58%、52%、40%和39%;在平均水力负荷为3.8 cm·d^{-1}下,人工湿地对家禽废水BOD_5、NH_3-N、TN的平均去除率为25%、20%和22%[24]。仅通过去除效果通常很难评判哪项技术或哪座工程处理性能更优,因为气温、面积、水力停留时间不相同,所以没有可比性。理论上,只要稳定塘、人工湿地和砂滤池面积足够大,停留时间足够长,则畜禽养殖废水均能达到排放标准。

自然处理容易受季节温度变化的影响[25],因此,不同温度下,单位面积自然处理系统对污染物的去除负荷是十分重要的指标。本研究团队通过15个月的试验,获得了氧化塘、人工湿地对氨氮的去除负荷(表1)[26],从试验结果看,氧化塘的去除负荷高于人工湿地。有研究表明,在10、25 ℃和35 ℃条件下,砂滤池氨氮去除负荷分别为9.87、31.6、31.2 g·m^{-2}·d^{-1},砂滤池对氨氮的去除负荷分别是氧化塘、人工湿地的7.77~15.9、14.1~23.8倍[27]。但是,砂滤池在运行过程中容易堵塞,需要经常翻动砂滤层。

以前,自然处理系统在我国南方如福建、广东一些养殖场应用较多,但由于处理效果不稳定,并且受到季节、粪污负荷变化的影响,目前该系统主要用于小型养殖场粪污处理,或者将氧化塘作为沼液或最终处理出水的储存池。

表1 两种自然处理系统对猪场废水厌氧消化液中氨氮的平均去除负荷[26](g·m^{-2}·d^{-1})

Table 1 Average removal load of ammonia nitrogen from anaerobically digested effluent of swine wastewater by two natural treatment systems[26](g·m^{-2}·d^{-1})

处理系统 Treatment system	春 Spring (8.3±5.1 ℃)	夏 Summer (25.7±2.8 ℃)	秋 Autumn (21.1±4.5 ℃)	冬 Winter (8.3±3.2 ℃)
氧化塘	1.27±0.38	1.99±0.44	1.37±0.25	1.45±0.26
潜流人工湿地	0.70±0.32	1.33±0.31	1.07±0.38	0.61±0.25

1.5 好氧处理

在没有足够土地进行沼液还田利用或自然处理的养殖场,需要采用好氧生物处理工艺对沼液进行净化。活性污泥法是当前应用最为广泛的废水好氧生物处理工艺,但传统的活性污泥法对畜禽养殖废水的效果处理较差,且成本较高,故较少应用于畜禽养殖废水的处理中。目前畜禽养殖废水常用的方法是具有间歇曝气特点的好氧处理工艺,如序批式活性污泥法(SBR)、缺氧/好氧(A/O)工艺、膜生物反应器

(MBR)等。对于浓度较低的畜禽养殖废水(COD低于4 000 mg·L^{-1}),可以采用好氧工艺进行处理。日本、西班牙、加拿大、意大利、美国以及我国都有采用活性污泥法[28-31]、A/O工艺[32-34]、MBR[35]直接处理猪场废水的案例。例如,美国VANOTTI等[36]采用固液分离-A/O处理猪场废水,TSS、VS、BOD_5、凯氏氮(TKN)、NH_4^+-N和TP的去除率分别达到97%、90%、99%、96%、96%和93%。近年来,国内也有许多环保公司采用两级A/O工艺直接处理猪场废水,该方法能使出水COD降到200 mg·L^{-1}以下,氨氮在25 mg·L^{-1}以下[37-38]。实际上,很少有好氧工艺直接处理畜禽养殖废水的工程案例,一般需要在好氧处理单元前采用固液分离或者絮凝强化的固液分离[31,33-34,36]作为预处理,而不是采用厌氧消化作为预处理。虽然好氧工艺能够直接处理高浓度的畜禽养殖废水,而且也能取得良好的处理效果,但是水力停留时间(HRT)长达13~20 d,废水耗电量10 kWh·m^{-3},并且污泥产量大[32-33]。

1.6 厌氧-好氧组合处理

对于高浓度畜禽养殖废水,通常采用先厌氧后好氧的生化处理工艺,即传统的厌氧-好氧组合工艺。厌氧单元主要采用完全混合式厌氧反应器(CSTR)、上流式厌氧污泥床(UASB)、升流式固体反应器(USR)、厌氧挡板反应器(ABR)、厌氧复合反应器(UBF)、黑膜沼气池等。好氧单元以往主要采用SBR工艺[39],近年来主要采用A/O工艺[37,40]或多级A/O工艺[41]。

试验研究和工程应用均发现,采用好氧处理工艺直接处理厌氧消化液,COD、NH_3-N的去除效果较差,COD去除率只有10%~70%,出水COD浓度在500 mg·L^{-1}以上,尽管NH_3-N去除率在80%左右,但出水NH_3-N仍在100 mg·L^{-1}以上[42-44]。处理效果差的主要原因在于,厌氧消化液在好氧后处理过程中,硝化作用消耗碱度致使处理系统的pH降低(低至6.0左右),从而影响了微生物的生长代谢[45]。解决这一问题最直接的办法是加碱提高pH,虽然该方法能改进NH_3-N的去除效果,但对TN去除的改善作用较小,并且每立方米废水加碱量大约1.0~2.0 kg,费用在2~4元,另外还需要人工投加,碱溶化、泵送等,操作繁琐。也有采用UASB-两级A/O组合工艺处理猪场废水并取得良好效果的报道,如陈凤祥[37]将UASB-两级A/O工艺应用于猪场废水处理中,在厌氧UASB容积负荷(以COD计)5.0 kg·m^{-3}·d^{-1},AO生化池污泥负荷在以每千克混合液悬浮固体(MLSS)计的活性污泥每天可承受的BOD_5的量为0.075的条件下,整个工艺对TN、COD、BOD_5的去除率分别在92%、97%、99%以上。这是因为废水在UASB中的水力停留时间短,有机物去除率较低,残留易降解有机物较多,能满足A/O工艺反硝化阶段对有机物的需求。在一些猪场废水处理工程中,UASB对COD的去除率通常只有50%~60%,只相当于沉淀池的作用。这种依靠UASB对有机物降解不充分而维持后续A/O对碳源需求的方法,容易导致后续A/O工艺运行不稳定。夏季气温高时,由于UASB对有机物充分降解而导致A/O单元碳源不足;冬季气温低时,由于UASB对有机物降解效率太低而导致A/O单元有机负荷过高,溶解氧不足。

厌氧消化液直接好氧处理存在的另一个问题是,由于厌氧消化液缺乏有机营养,废水处理工程启动时污泥培养困难,有的猪场废水处理工程经过4年调试都没有培养出足够的活性污泥。因此,另一个解决办法是补充碳源,工程上有加面粉、饲料,甚至加红糖或葡萄糖,但添加这些碳源的费用很高,工程上很难应用。邓良伟等提出了厌氧消化液配原水的技术路线,添加原水能改善厌氧消化液好氧后处理过程中的反硝化作用,反硝化产生的碱度可以回补硝化阶段消耗的碱度,使pH能稳定在7.0以上,进而使厌氧消化液(沼液)好氧处理效果得到了很大改善。试验表明,好氧处理工艺(SBR)对配原水后沼液中COD、BOD_5、NH_3-N、TN和TP的平均去除率分别达到89.8%、98.7%、99.5%、93.5%和54.8%,出水COD、BOD_5、NH_3-N、TN和TP分别为288、15.6、3.89、51.9 mg·L^{-1}和51.9 mg·L^{-1}[39,45-47]。基于试验结果,邓良伟等[39]构建了配水比例模型,建立了"厌氧-配原水-间歇曝气(Anaerobic-adding raw wastewater- intermittent aeration,简称Anarwia)"的养殖废水处理工艺,即大部分畜禽养殖废水先进行厌氧消化,再与小部分未经厌氧消化的废水混合,然后采用间歇曝气的SBR或A/O工艺进行好氧后处理,该工艺只需增加1台配水泵,在工程中容易实现,因此获得了工程技术人员的广泛认同,同时也在养殖废水以及其他高氮高浓度有机废水处理工程中得到了大面积应用[48-52]。

"厌氧-配原水-间歇曝气"工艺解决了厌氧消化液好氧后处理效果差的问题。前面提到,畜禽养殖废水还存在升温困难和厌氧处理冬季效率低的问题。针对这两个问题,可以采用浓稀分流-厌氧-好氧组合处理工艺进行解决。YANG等[11]通过浓稀分离,将猪场废水分离成体积比1:9、2:8、3:7的浓污水和稀

污水,浓污水用于厌氧消化,厌氧消化后的沼液与稀污水混合后再采用SBR进行好氧处理,SBR对浓稀比1:9的混合液中COD的去除率能达到86.4%,好氧处理出水COD平均浓度为447 mg·L^{-1};浓稀比2:8混合液中COD的去除率最高,能够达到91.0%,出水COD平均浓度为256 mg·L^{-1};浓稀比3:7混合液中COD的去除率只能达到56.8%,出水COD平均浓度为949 mg·L^{-1}。在进水NH_3-N浓度为652~668 mg·L^{-1}的条件下,SBR对浓稀比1:9、2:8、3:7混合液中NH_3-N的去除率分别达到99.6%、99.7%、87.5%,出水NH_3-N浓度分别为2.76、2.02、81.7 mg·L^{-1}。浓稀比2:8的系统获得了最优的好氧处理效果;同时,浓污水能产生总产量73.79%的沼气,采用发电余热升温,厌氧消化温度可以提高27.8 ℃,从而可以确保冬季正常处理效果与沼气生产。

尽管浓稀分流-厌氧-好氧组合处理工艺既能改善厌氧消化出水好氧后处理的效果,又能解决厌氧处理冬季效率低的问题,但是,与传统的厌氧-好氧组合工艺相比,沼气产量会减少大约30%。最好的厌氧-好氧组合处理工艺应该是既能解决养殖废水处理存在的两个问题,又能保持沼气不减少。畜禽养殖废水厌氧出水后处理的最大难点在于高氮低碳消化液的脱氮,短程硝化-厌氧氨氧化工艺为高氮低碳废水的脱氮带来了新的希望。将厌氧消化与短程硝化-厌氧氨氧化工艺组合在畜禽养殖废水处理中已经有许多研究[53],目前主要处在实验室小试阶段。在35 ℃条件下,WANG等[54]采用短程硝化-厌氧氨氧化颗粒污泥处理猪场废水厌氧消化液,获得了73%的TN去除率和3.9 kg·m^{-3}·d^{-1}的TN去除负荷,TN去除负荷约是传统硝化/反硝化脱氮工艺的10倍。在福建、广东、广西、云南等南方地区的一些猪场废水处理工程中,可以看到一些红色颗粒污泥,自然形成了厌氧氨氧化过程。有研究表明,在自然形成了厌氧氨氧化过程的多级A/O猪场废水处理工程中,在缺氧区,厌氧氨氧化对TN去除的贡献达到78.3%,而在好氧区只有40%。整个系统厌氧氨氧化对TN去除的贡献率为61.5%,而反硝化的贡献率为38.5%[55]。而在北方一座采用A^2/O的猪场废水厌氧消化液处理工程中,通过基于硝态氮的碳源调控和间歇曝气,TN去除率达到65.5%~83.5%,厌氧氨氧化对TN去除的贡献率达到39%~77%[56]。

1.7 深度处理

畜禽养殖废水经过厌氧-好氧二级生化处理后,主要污染物能达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)。一些环境脆弱、敏感的地区要求处理出水达到更加严格的《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准,即COD小于100 mg·L^{-1},氨氮小于15 mg·L^{-1},色度小于50倍,磷酸盐小于0.5 mg·L^{-1}。为了达到严格的排放标准,必须对二级生化处理出水进行三级处理。三级处理也称深度处理或高级处理,主要方法有混凝、电解、臭氧氧化、芬顿氧化、膜分离等[57]。

通过投加混凝剂使废水中难以自然沉淀的胶体物质以及细小的悬浮物聚集成较大的颗粒,从而与水分离的过程称为混凝。混凝是畜禽养殖废水处理中广泛采用的方法,该方法既可以作为独立的处理方法,也可以和其他方法配合使用,作为预处理、中间处理或最终处理。混凝的优点是设备简单、操作容易、能耗低、处理效果较好,且间歇或连续运行均可;缺点是处理出水浓度仍然较高、污泥量比较大、药剂费用较高。常用的混凝剂有硫酸铝、聚合氯化铝(PAC)、三氯化铁、硫酸亚铁、聚合硫酸铁(PFS)、聚丙烯酰胺(PAM)等。混凝主要去除悬浮物和COD,对COD的去除率在50%左右[58],目前工程上常用的絮凝剂有石灰、PAC和PAM,废水生化出水絮凝的药剂费为2.5~4元·m^{-3}。

电解是在直流电的作用下,污染物生成不溶于水的沉淀物或生成气体而从水中逸出,从而实现废水的净化。根据电极反应发生方式的不同,可分为电絮凝法、电气浮法和电催化氧化法(也称电解氧化法)等,其中应用较多的是电解氧化法。电解氧化法既可以去除COD,也能去除氨氮,COD去除率超过70%,氨氮去除率超过90%,但是该方法能耗太高,去除1 kg氨氮或是1 kg COD的电耗基本上均在90 kWh左右[59-61]。

化学氧化法是通过氧化剂的氧化作用,使难降解的有机物转化为易降解有机物,或将有机物彻底氧化为CO_2和H_2O的方法。目前常用的化学氧化剂有臭氧、氯系氧化剂、过氧化氢等。臭氧氧化脱色效果好,对COD的去除率较低(约50%),而且电耗高。臭氧氧化用于猪场废水深度处理时,去除1 g COD需要消耗7.28 g臭氧[62],产生1 kg臭氧电耗一般为14~22 kWh,因此去除1 kg COD需要耗电大约140 kWh。氯系氧化剂有次氯酸钙、次氯酸钠、二氧化氯等,其脱色效果较好,对COD去除可达30%~50%,每立方米废水所需药剂费用大约3元。以过氧化氢作为氧化剂,Fe^{2+}作为催化剂的氧化即Fenton氧化法,在猪场废水

生化出水深度处理中应用较广泛，其脱色效果高，COD去除率高，能超过70%，出水COD在100 mg·L^{-1}以下。在生化系统处理效果较好的情况下，Fenton氧化法的药剂费每立方米废水约为3元。如果生化系统处理效果差，例如生化出水COD为947 mg·L^{-1}时，采用Fenton氧化法，硫酸亚铁、双氧水和石灰的投加量大，每立方米废水的处理费用则高达15.16元[63]。

膜分离是以压力为驱动力，利用膜的选择透过性将离子或分子或某些微粒从水中分离的过程。根据膜的孔径大小可以分为微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）、反渗透（RO）等。超滤、纳滤、反渗透对猪场废水生化处理出水COD的去除率分别可达50%、70%、90%，对氨氮的去除率可达28%、48%、79%。反渗透膜虽然能达到很好的出水效果，但是浓水比例达到20%~50%。膜分离最大的问题是膜污染导致膜通量下降，因此需要经常洗膜或者更换膜。

通过最近几年对畜禽养殖废水处理工程的调查发现，以种猪场每头母猪产生40 L废水，育肥猪场每头存栏猪产生10 L废水的水量计算，处理出水达到《农田灌溉水质标准》（GB 5084—2021）与《畜禽养殖业污染物排放标准》（GB 18596—2001）最严值，厌氧、好氧生化处理加上深度处理，废水处理成本为10~15元·m^{-3}，出栏1头肥猪，废水处理费用为20~25元。

2 结论与展望

总结以上有关畜禽养殖废水处理利用技术研究及应用现状的分析，可以得出以下结论。

（1）畜禽养殖废水处理利用可以分为还田利用和达标处理两种模式。周边有足够土地消纳粪污/沼液的中小养殖场时，主要采用还田利用模式；大型、特大型养殖场，特别是南方水网地区、山丘区的养殖场，周边没有足够土地供粪污、沼液还田利用时，主要采用达标处理模式。

（2）还田利用和达标处理模式，通常都需要采用厌氧消化进行前处理。厌氧消化工艺主要采用传统消化工艺（如地下水压式沼气池、黑膜沼气池）和高效厌氧反应器（如完全混合式厌氧反应器、上流式厌氧污泥床、升流式固体反应器等）。

（3）达标处理模式主要采用“固液分离-厌氧-好氧-深度处理”工艺。工程上，固液分离通常采用水力筛和振动筛，好氧生化处理主要采用序批式反应器和缺氧/好氧工艺。

（4）仅生化处理难以达到排放标准，通常需进行深度处理，应用较多的深度处理方法有混凝、芬顿氧化等。

展望未来，畜禽养殖废水处理利用技术可能呈现以下趋势。

（1）打通沼气利用通道，提升厌氧处理减污降碳协同效应。甲烷排放量在全球温室气体排放量中约占20%。在农业行业，畜禽养殖与粪便管理是温室气体排放的主要贡献者。在“碳中和”的形势下，国家有可能出台甲烷限量排放标准，废水厌氧处理产生的沼气直接排放将会受到限制。

（2）总氮去除将会成为畜禽养殖废水达标处理的新要求。对于大型、特大型畜禽养殖场，处理后的出水仍然难以完全还田利用。目前，许多地方要求处理出水达到《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T 31962）后进入城镇污水处理厂，该标准对总氮有较高要求。另外，一些省市修订的《集约化畜禽养殖业水污染物排放标准》也提出了总氮排放要求。因此，在以后的畜禽养殖废水处理技术研究与应用中，应关注总氮的去除，短程硝化-厌氧氨氧化技术将会是畜禽养殖废水研究与应用的热点。

（3）智能化信息技术在废水处理工程中的应用将会更加广泛。在废水处理工程中应用智能化信息技术可以减少人工、提高运行稳定性、有效降低费用、提升废水处理效率。利用数据采集、物联网、大数据、无线传输、反馈信号调节等技术提升废水处理自动化、智能化程度，将会是现代畜禽废水处理工程的发展趋势。

参考文献：

[1] 李洋. 猪场废水浓稀分流及其对沼气发酵的影响[D]. 成都：成都信息工程学院，2013. LI Y. Concentration-dilution segregation of swine wastewater and its effect on biogas fermentation[D]. Chengdu: Chengdu Institute of Information Engineering, 2013.

[2] DENG L W, CHEN Z A, YANG H, et al. Biogas fermentation of swine slurry based on the separation of concentrated liquid and low content liquid[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2012, 45(10): 187-194.

[3] DENG L W, LI Y, CHEN Z A, et al. Separation of swine slurry into different concentration fractions and its influence on biogas fermentation [J]. *Applied Energy*, 2014, 114(2): 504-511.

[4] YANG D, DENG L W, ZHENG D, et al. Separation of swine wastewater into solid fraction, concentrated slurry and dilute liquid and its influence on biogas production[J]. *Fuel*, 2015, 144: 237-243.

[5] 林代炎，钱蕾，林琰. 应用机械处理规模化养猪场的污水效果分析[J]. 能源与环境，2005(2): 56-58. LIN D Y, QIAN L, LIN Y. Analysis on the effect of mechanical treatment of sewage from large-scale pig farm[J]. *Energy and Environment*, 2005(2): 56-58.

[6] 林代炎, 姚宝全, 林琰, 等. 4种分离机械对规模化猪场污水处理效果研究[J]. 中国农学通报, 2005(6):427-429. LIN D Y, YAO B Q, LIN Y, et al. Technical research on reducing thickness of sewage in large-scale pig farm by using separators[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005(6):427-429.

[7] 徐洁泉, 胡伟, 汤玉珍, 等. 低温和近中温猪粪液厌氧处理的装置比较研究[J]. 中国沼气, 1997, 15(2):7-13. XU J Q, HU W, TANG Y Z, et al. A comparative study on different reactors treating screened pig manure at low-temperature[J]. *China Biogas*, 1997, 15(2):7-13.

[8] YANG H N, DENG L W, LIU G J, et al. A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater[J]. *Water Research*, 2016, 102:464-474.

[9] YANG H N, DENG L W, WANG L, et al. Comparison of three biomass-retaining reactors of the ASBR, the UBF and the USR treating swine wastewater for biogas production[J]. *Renewable Energy*, 2019, 138:521-530.

[10] 杨红男, 邓良伟. 不同温度和有机负荷下猪场粪污沼气发酵产气性能[J]. 中国沼气, 2016, 34(3):36-43. YANG H N, DENG L W. The biogas production performance of anaerobic digestion of swine wastewater under different organic loading rate and temperatures[J]. *China Biogas*, 2016, 34(3):36-43.

[11] YANG D, DENG L W, ZHENG D, et al. Separation of swine wastewater into different concentration fractions and its contribution to combined anaerobic-aerobic process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168:87-93.

[12] 杨迪, 邓良伟, 郑丹, 等. 猪场废水固液分离及其影响因素研究[J]. 中国沼气, 2014, 32(6):21-25. YANG D, DENG L W, ZHENG D, et al. Solid-liquid separation of swine wastewater and its influencing factors[J]. *China Biogas*, 2014, 32(6):21-25.

[13] LIU Y, MA S C, HUANG L, et al. Two-step heating mode with the same energy consumption as conventional heating for enhancing methane production during anaerobic digestion of swine wastewater[J]. *Environmental Management*, 2018, 209:301-307.

[14] 谭婧, 宋波. 浓稀分流-重点增温模式在猪粪沼气工程中的应用[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(5):211-214. TAN J, SONG B. Application of gravitational settling-selective heating model in biogas engineering of swine manure[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(5):211-214.

[15] LOURINBO G, RODRIGUES L F T G, BRITO P S D. Recent advances on anaerobic digestion of swine wastewater[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, 17(12):4917-4938.

[16] FUCHS W, WANG X, GABAUER W, et al. Tackling ammonia inhibition for efficient biogas production from chicken manure: Status and technical trends in Europe and China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 97:186-199.

[17] 林鸿雁, 叶美锋, 吴飞龙, 等. 沼液的综合利用现状综述[J]. 福建农业科技, 2012(1):75-77. LIN H Y, YE M F, WU F L, et al. Current situation of comprehensive utilization to biogas slurry[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2012(1):75-77.

[18] 汪崇, 高琳, 杨文亮. 以猪粪为主要发酵原料的沼液成分初步研究[J]. 现代畜牧兽医, 2012(8):51-52. WANG C, GAO L, YANG W L. Preliminary study on composition of biogas slurry with pig manure as main fermentation raw material[J]. *Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2012(8):51-52.

[19] 霍翠英, 吴树彪, 郭建斌, 等. 猪粪发酵沼液中植物激素及喹啉酮类成份分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(5):7-10. HUO C Y, WU S B, GUO J B, et al. Analysis of phytohormone and qunolin-ketone components in anaerobic digestion effluent[J]. *China Biogas*, 2011, 29(5):7-10.

[20] 李欣. 厌氧发酵液植物营养物质变化及吲哚乙酸代谢途径解析[D]. 北京:中国农业大学, 2016. LI X. Changes of plant nutrients in anaerobic fermentation broth and analysis of indoleacetic acid metabolic pathway[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.

[21] 施建伟, 雷国明, 李玉英, 等. 发酵底物和发酵工艺对沼液中挥发性有机酸的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(3):55-58. SHI J W, LEI G M, LI Y Y, et al. Effects of fermentation raw material and process on volatile organic acids in biogas slurry[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(3):55-58.

[22] 谷晓明, 邢可霞, 易礼军, 等. 农村养殖户畜禽粪污综合利用的公共私营合作制(PPP)模式分析[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1):62-69. GU X M, XING K X, YI L J, et al. Introduction of Public-Private-Partnership(PPP) into comprehensive utilization of livestock waste from rural livestock keepers[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(1):62-69.

[23] 郑丹, 王芳, 符婧, 等. 畜禽粪污厌氧消化液自然处理模式技术的研究与应用现状[J]. 中国沼气, 2018, 36(5):24-29. ZHENG D, WANG F, FU J, et al. Research and application status of natural treatment technology for anaerobically digested effluent of livestock and poultry wastewater[J]. *China Biogas*, 2018, 36(5):24-29.

[24] KNIGHT R L, PAYNE W E J R, BORER R E, et al. Constructed wetlands for livestock wastewater management[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(1/2):41-55.

[25] OCHOA M P, ESTRADA V, HOCH P M. Wastewater stabilization ponds system: Parametric and dynamic global sensitivity analysis[J]. *Ind Eng Chem Anal Res*, 2016, 55(44):11403-11416.

[26] LIU G J, ZHENG D, DENG L W, et al. Comparison of constructed wetland and stabilization pond for the treatment of digested effluent of swine wastewater[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(21):1-10.

[27] 樊战辉. 生物砂滤池处理猪场厌氧消化液高浓度氨氮的研究[D]. 成都:成都信息工程学院, 2011. FAN Z H. Study on treatment of high concentration ammonia nitrogen in anaerobic digestion liquid of pig farm by biological sand filter[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2011.

[28] 高云超, 邝哲师, 田兴山, 等. 猪场污水活性污泥-氧化塘法处理效果及环境问题探讨[J]. 广东农业科学, 2003(3):46-49. GAO Y C, QI Z S, TIAN X S, et al. Discussion on treatment effect and environmental problems of swine wastewater by activated sludge oxidation pond method[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2003(3):46-49.

[29] 陈梅雪, 杨敏, 贺泓. 日本畜禽产业排泄物处理与循环利用的现状与技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005(3):5-11. CHEN M X, YANG M, HE H. The current status and treatment techniques of

livestock excrement in Japan[J]. *Environmental Pollution Control Technology and Equipment*, 2005(3):5-11.

[30] LO K V, LIAO P H, KLEECK V. Full-scale sequencing batch reactor treatment of dilute swine wastewater[J]. *Canadian Agricultural Engineering*, 1991, 33(1):193-195.

[31] PICCININI S, VERZELLESI F, MANTOVI P. Biological nutrient removal in a full sequencing batch reactor treating pig slurry[C]. Proceedings of the 10th international conference of the RAMIRAN network. Strbske Pleso, High Tatras, Slovak Republic, 2002:391-395.

[32] VANOTTI M B, SZOGI A A, HUNT P G, et al. Development of environmentally superior treatment system to replace anaerobic swine lagoons in the USA[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(17):3184-3194.

[33] VANOTTI M B, SZOGI A A, MILLNER P D, et al. Development of a second-generation environmentally superior technology for treatment of swine manure in the USA[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22):5406-5416.

[34] RIAÑO B, GARCÍA-GONZÁLEZ M C. On-farm treatment of swine manure based on solid-liquid separation and biological nitrification-denitrification of the liquid fraction[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 132:87-93.

[35] 孟海玲, 董红敏, 黄宏坤. 膜生物反应器用于猪场污水深度处理试验[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1277-1281. MENG H L, DONG H M, HUANG H K. A membrane bioreactor for swine wastewater advanced treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1277-1281.

[36] VANOTTI M B, RO K S, SZOGI A A, et al. High-rate solid-liquid separation coupled with nitrogen and phosphorus treatment of swine manure: Effect on water quality[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2018, 2:1-15.

[37] 陈凤祥. UASB/两级AO工艺处理养猪废水的应用研究[J]. 广东化工, 2016, 43(4):89-90. CHEN F X. Study on the application of UASB/two level AO process for treating swine wastewater[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(4):89-90.

[38] 罗义春, 董闽鲜, 赖贻奎, 等. 采用不同方式处理养猪场污水的效果观察[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2016(1):17-19, 20. LUO Y C, DONG M X, LAI Y K, et al. Observation on the effect of different ways to treat pig farm sewage[J]. *Jiangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2016(1):17-19, 20.

[39] DENG L W, CAI C D, CHEN Z A. The treatment of pig slurry by a full-scale anaerobic-adding raw wastewater-intermittent aeration process[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(3):327-334.

[40] 单晓明. 猪场养殖废水的工艺案例及探讨[J]. 广东化工, 2019, 46(9):187-188, 203. SHAN X M. Study on the technology of pig farm wastewater[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2019, 46(9):187-188, 203.

[41] 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. WU H N, ZHANG Z, LIAO J H, et al. Commissioning of shortcut simultaneous nitrification and denitrification in multilevel A/O for swine biogas liquid treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(13):35-39, 45.

[42] DENG L W, ZHENG P, CHEN Z A. Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using IC-SBR process with bypass of raw wastewater[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41:965-969.

[43] 龚松. EGSB+生物接触氧化+MBR处理规模化猪场废水的试验研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2014. GONG S. Experimental study of EGSB+bio-contact oxidation+MBR in swine wastewater treatment[D]. Wuhan: Wuhan University of science and technology, 2014.

[44] 刘媛媛. 两级A-O工艺运行改进对覆膜沼液深度处理的影响及生化学机制[D]. 广州:华南农业大学, 2016. LIU Y Y. The effect and biochemistry mechanism of biogas slurry treatment by two-stage A/O processes improvement[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.

[45] DENG L W, ZHENG P, CHEN Z A, et al. Improvement in post-treatment of digested swine wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(8):3136-3145.

[46] 邓良伟, 蔡昌达, 陈铭铭, 等. 猪场废水厌氧消化液后处理技术研究及工程应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3):92-94. DENG L W, CAI C D, CHEN G M, et al. Study and application of technology for post-treatment of anaerobically digested effluent of piggery wastewater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3):92-94.

[47] 邓良伟, 郑平, 陈子爱. Anarwia工艺处理猪场废水节能效果的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12):172-175. DENG L W, ZHEN P, CHEN Z A. Efficiency of energy-saving of anaerobic-adding raw wastewater-intermittent aeration (Anarwia) process for treatment of piggery wastewater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12):172-175.

[48] 寿亦丰, 蔡昌达, 林伟华, 等. 杭州灯塔养殖总场沼气与废水处理工程的技术特点[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1):29-32. SHOU Y F, CAI C D, LIN W H, et al. Technical characteristics of biogas and wastewater treatment project in Hangzhou Dengta farm[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(1):29-32.

[49] KIM D H, CHOI E, YUN Z, et al. Nitrogen removal from piggery waste with anaerobic pre-treatment[J]. *Water Science and Technology*, 2004, 49(5/6), 165-171.

[50] RAJAGOPAL R, ROUSSEAU P, BERNET N, et al. Combined anaerobic and activated sludge anoxic/oxic treatment for piggery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):2185-2192.

[51] 余薇薇, 张智, 毕胜兰, 等. 改良型两级A/O工艺处理畜禽养殖场的沼液研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(1):8-11. YU W W, ZHANG Z, BI S L, et al. Improved two-stage A/O process for treatment of biogas slurry from livestock and poultry breeding farm[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(1):8-11.

[52] 贺仲兵, 刘云国. 添加原水在猪场废水处理中的应用[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013, 24:83-84. HE Z B, LIU Y G. Application of adding raw water in pig farm wastewater treatment[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2013, 24:83-84.

[53] MAGRÍ A, BÉLINE F, DABERT P. Feasibility and interest of the anammox process as treatment alternative for anaerobic digester supernatants in manure processing: An overview[J]. *Journal of Environ-*

mental Management, 2013, 131:170-184.

[54] WANG S, WANG L, DENG L, et al. Performance of autotrophic nitrogen removal from digested piggery wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241:465-472.

[55] WANG X J, YANG R L, ZHANG Z J, et al. Mass balance and bacterial characteristics in an in-situ full-scale swine wastewater treatment system occurring anammox process[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 292, 122005.

[56] CHEN Y, ZHENG R, SUI Q, et al. Coupling anammox with denitrification in a full-scale combined biological nitrogen removal process for swine wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 329: 124906.

[57] DOMINGUES E, FERNANDES E, GOMES J, et al. Advanced oxidation processes perspective regarding swine wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776(3):145958.

[58] 杨迪, 邓良伟, 郑丹, 等. 猪场废水厌氧-好氧处理出水的深度处理[J]. 中国沼气, 2015, 33(5):16-22. YANG D, DENG L W, ZHEN D, et al. The further treatment of the effluent from combined anaerobic-aerobic process treating pig waste[J]. *China Biogas*, 2015, 33(5): 16-22.

[59] 渠光华, 张智, 郑海领. 电化学氧化法去除超高盐榨菜废水中的氨氮[J]. 环境工程学报, 2013, 7(3):815-819. QU G H, ZHANG Z, ZHENG H L. Removal of ammonia nitrogen from hypersaline pickle wastewater by electrochemical oxidation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(3):815-819.

[60] 袁芳, 代晋国, 范洪波, 等. 老龄垃圾渗滤液高氨氮的电化学氧化及其能耗分析[J]. 水处理技术, 2012, 38(3):55-59. YUAN F, DAI J G, FAN H B, et al. Ammonia removal and energy consumption of mature landfill leachate treatment with electrochemical oxidation [J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, 38(3):55-59.

[61] 魏琳. 工业难降解有机污染物的电化学氧化处理方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2011. WEI L. Electrochemical oxidation technology for the treatment of refractory industrial organic wastewater[D]. Wuhan:Wuhan University, 2011.

[62] 潘松青, 张召基, 陈少华. 臭氧氧化法深度处理养猪废水研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6):153-157. PAN S Q, ZHANG Z J, CHEN S H. On the advanced treatment of swine sewage *via* ozonation process[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(6):153-157.

[63] 汪文强, 王电站, 颜成, 等. 常规生化/物化工艺处理猪场废水效果及存在问题[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21):32-39. WANG G Q, WANG D Z, YAN C, et al. Efficiency and problems in conventional biochemical/physicochemical combined process for swine wastewater treatments[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(21):32-39.