

# 畜禽废水吹脱处理工艺应用研究综述

史亚微<sup>1</sup>, 王堉<sup>2</sup>, 高虹<sup>2</sup>, 王帅<sup>2</sup>, 宋繁永<sup>3</sup>, 李天元<sup>3</sup>, 黄玉杰<sup>3</sup>, 潘美霖<sup>1\*</sup> (1.北京航天威科环保科技有限公司, 北京 102401; 2.华航环境发展有限公司, 北京 102442; 3.山东省科学院生态研究所(山东省科学院中日友好生物技术研究中心), 山东济南 250103)

**摘要** 随着我国养殖规模快速扩大, 畜禽废水大量产生, 对养殖场周边生态环境造成严重威胁。曝气吹脱是处理畜禽废水诸多工艺中的重要环节, 在有效降低畜禽废水有机污染物负荷的同时, 还可以回收废水中的氮磷等元素为肥料。然而, 关于吹脱工艺处理畜禽废水还没有相关的研究综述。因此, 该研究旨在总结吹脱法回收养殖场废水中铵盐的经验以及比较不同工况下的吹脱效率。此外, 还比较了包含吹脱技术的几种复合处理系统对畜禽废水的处理效果以及主要的影响参数。结果表明, 各处理系统可以通过从废水中提取有附加值的化合物及副产品, 说明吹脱是脱除养殖废水和沼液中污染负荷的有效方法; 另一方面, 吹脱处理养殖废水和沼液的研究还不够广泛, 需要开展更多的研究。

**关键词** 吹脱工艺; 硫酸铵; 鸟粪石; 沼液; 氨氮; 畜禽废水

**中图分类号** X713 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)14-0013-05

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.14.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Application of Air Stripping on Livestock Wastewater Treatment

SHI Ya-wei<sup>1</sup>, WANG Yao<sup>2</sup>, GAO Hong<sup>2</sup> et al (1. Beijing Aerospace Wks Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 102401; 2. China Aerospace Environmental Development Co., Ltd., Beijing 102442)

**Abstract** With the rapid development of livestock raising, a large amount of wastewater is produced, which poses a serious threat to the surrounding environment. Air stripping is one of the most important processes in wastewater treatment. Air stripping can effectively reduce the contents of organic pollutants in wastewater. Meanwhile, nitrogen and phosphorus can also be recovered as fertilizer during the process. However, there has been little review on the wastewater treatment by air stripping. Therefore, the purpose of this review was to summarize the experience of ammonium recycling in swine wastewater by air stripping, recovery efficiency was also compared under different working conditions. Besides, the effects of several composite treatment systems with air stripping were also compared and the influencing parameters was discussed. The results showed that the treatment system could recover some valuable by-products from the wastewater, indicating that air stripping was an effective method for removing and reducing the pollution contents in wastewater. On the other hand, more research was needed on the wastewater treatment with air stripping.

**Key words** Air stripping; Ammonium sulfate; Struvite; Digestate; Ammonia nitrogen; Livestock wastewater

我国是世界畜禽养殖大国, 大多数小型养殖厂产生的粪尿与养殖废水未经妥善利用和处理直接排放到环境中, 对环境生态及人畜健康构成威胁。养殖废水量大且因含有大量的有机物和氮化合物等污染物使其较难处置, 若处理不当很容易造成地表水甚至地下水的污染。养殖废水一直是养殖场面临的棘手问题。养殖废水处置过程一般包括物理、化学以及生物方法。但由于高浓度的氨氮抑制了微生物的活性, 所以这些方法大都存在高耗低效不稳定的弊端。利用混凝/絮凝等化学方法处理废水会产生大量的污泥, 其中可能含有重金属等污染物, 加之包括我国在内的很多国家对养殖废水出水要求比较严格, 所以废水在用作有机肥前需要进一步处理。

限于技术与成本等原因, 大多数畜禽废水的处理方法对于小型养殖场是不现实的, 所以对畜禽废水进行集中处理(好氧/厌氧/人工湿地)的相关研究受到极大关注。研究表明, 这些处理工艺可以通过调节废水的物化特性后进行处理以减少其污染物负荷<sup>[1-3]</sup>。然而这些方法仍存在一些弊端, 如人工湿地中的各种水质参数难以调整, 导致其处理过程周期较长(几周甚至几个月)。用于处理农工业废物和废水的厌氧消化由于可以迅速调节水质物化特性, 是目前处理畜禽

废水比较可行的方法<sup>[4-6]</sup>。然而畜禽废水中的高氨含量(大于 4.0 g/L)会抑制甲烷细菌的活性导致处理效果不佳。据了解, 畜禽废水的甲烷产量约为 50 mL/g COD 或 100~200 mL/g VS, 仅为其理论产量的 1/5<sup>[7-9]</sup>。另一方面, 可以通过物理化学处理从畜禽废水中回收其中高含量的铵和磷化合物用作天然肥料, 如鸟粪石和硫酸铵<sup>[10]</sup>。从畜禽废水中使用恰当的技术提取这些化合物不仅可以使它们得到回收, 而且还可以使废水的后续处理更容易, 如可以提高人工湿地的净化效率和厌氧消化处理时的甲烷产量。

吹脱法(或曝气-吹脱法)是畜禽废水中氮回收的常用方法。通过向废水加入碱(如 NaOH、Ca(OH)<sub>2</sub> 或 CaO)提高其 pH, 然后经过曝气吹脱后分离出来的含氨空气通过含酸的吸附装置转化为硫酸铵, 未被吸附的含氨空气冷凝形成氨水。当作为预处理时, 吹脱会降低畜禽废水后续处理时的氨抑制作用, 降低厌氧消化后的出水中氨氮含量; 作为后续处理手段时, 吹脱法可有效减少沼液中氨氮含量和有机污染负荷, 使出水可以用作大田灌溉, 从而得到更好的利用。

前人报道了利用曝气-吹脱法处理不同来源的废水, 如城市或工业废水、尿液和粪肥, 以及沼液中营养物质的回收<sup>[11]</sup>。然而, 目前还没有关于利用空气吹脱方法去除养猪废物中氨的研究综述。笔者在分析空气吹脱法在畜禽废水中的应用基础上, 从技术、经济和环境可持续性等方面对该研究方向未来的发展提出了建议。

**基金项目** 国家重点研发计划项目(2019YFC1804103)。

**作者简介** 史亚微(1986—), 女, 北京人, 高级工程师, 硕士, 从事污水治理与工程设计研究。\* 通信作者, 助理工程师, 硕士, 从事污水治理与工程设计研究。

**收稿日期** 2020-11-25

## 1 空气吹脱效率影响因素

由于简便经济且高效,曝气吹脱是从水溶液中去掉包括氨在内的挥发性污染物最常见的方法之一。然而,吹脱的大规模应用仍处于起步阶段。因此,需要更多的研究通过降低成本提高效率来巩固其实际应用。吹脱对液相中污染物去除效率主要取决于4个参数:pH、温度、气流速以及废水物化性质。

**1.1 操作参数对氨氮去除效果的影响以及吹脱应用的缺点** 吹脱是一种基于解吸的传质过程,它将气体从液体转移到气相。在废水中,氨以铵离子( $\text{NH}_4^+$ )和氨气( $\text{NH}_3$ )2种形式存在,并按式(1)保持平衡:



$$[\text{NH}_3] = \frac{[\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+]}{1 + [\text{H}^+]/K_a} \quad (2)$$

$$\text{p}K_a = 4 \times 10^8 T^3 + 9 \times 10^{-5} T^2 + 0.035 6T + 10.072 \quad (3)$$

分子氨和铵离子的相互关系以及受pH和温度的影响如式(2)、(3)所示。式中,  $[\text{NH}_3]$  为氨分子浓度 (mol/L),  $[\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+]$  为总氨氮浓度 (mol/L),  $[\text{H}^+]$  为氢离子浓度 (mol/L),  $K_a$  为酸电离常数,  $T$  为温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $\text{p}K_a$  为无量纲单位。若pH为酸性、中性或微碱性(小于8.5),则平衡反应向右进行;若pH增大(大于8.5),分子氨的形成增强<sup>[12]</sup>。

常见的吹脱工艺方案见图1。该处理的目的是从畜禽废水中去除氨氮化合物,当废水pH增加到一定程度后,废水中几乎所有的 $\text{NH}_4^+$ 都可以转化为 $\text{NH}_3$ 。因此,该处理的第一步通常是向废水/沼液中添加碱溶液,以提高其pH。第二步通常为曝气,以可以改变废水气液边界,从而使 $\text{NH}_3$ 从废水中逸出。温度对废水中分子氨的去除起着重要作用<sup>[13]</sup>。温度的增加增强了氨分子在废水表面的扩散,同时曝气形成的气泡有利于废水中氨气的逸出<sup>[14]</sup>。由于不同的空气流速(AFR)可以在液/气界面建立不同的氨浓度梯度,所以AFR是影响废水中氨去除率的另一个重要参数:在通气时,水中的自由氨瞬间自发混合,并且从相对高浓度的区域移动到较低浓度的区域。因此,气流的引入大大改善了氨从废水向空气中的转移。吹脱产生含有 $\text{NH}_3$ 的水蒸气被冷凝器收集为氨水,而剩余的气态氨最终被包含酸性溶液(一般为 $\text{H}_2\text{SO}_4$ )的捕集器收集,氨氮以盐的形式回收。前人研究中常见吹脱工艺的废水pH为10.0~11.0,温度为80 $^\circ\text{C}$ , AFR为0.5~10 L/min。

**1.2 铵盐回收工艺及吹脱工艺的选择** 虽然吹脱是一种有效的废水除氨方法,但该工艺存在如氨提塔结垢、污泥产量大等缺点,此外,若溢出的氨气未被完全吸收则会散逸至大气,对环境造成损害。汽提塔的结垢通常是由于在填料表面形成的盐类(如碳酸钙)。此外,吹脱工艺的高成本可能会限制其规模化应用。

吹脱前需要用化学药剂调节废水pH提高到9.5以上以便废水中的铵根离子形成分子氨,而吹脱后产生的污泥则需要用酸调低pH以便后续处理,这些药剂的大量使用会增加废水处理总成本。因此,开展废水pH与氨回收效率的相关

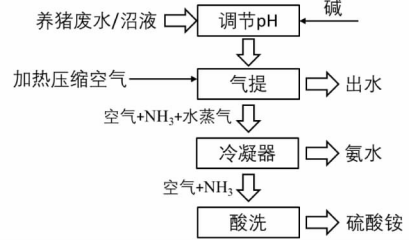


图1 吹脱法合成硫酸铵工艺路线

Fig.1 Process route for synthesis of ammonium sulfate by air stripping

研究有助于降低吹脱工艺的成本并提高吹脱效率。研究表明,不同类型的碱对废水中氨的去除率影响不显著,而加热和曝气率的改变可以弥补pH调整不到位的情况,从而降低了废水处理成本<sup>[15]</sup>。废水中的氨氮浓度是影响吹脱效率的另一个重要因素。为了保证较高的浓度扩散梯度,曝气量需要随着废水氨氮浓度的升高而增加。另外,由于副产品产量质量等因素的影响,对氨氮浓度小于2 g/L的废水进行吹脱是不划算的<sup>[16]</sup>。除工艺成本外,若是存在气密性不严等问题,吹脱出的氨气很容易排放到大气中。因此,吹脱后的氨应尽量吸附于填料塔中以便使其以盐的形式存在,从而阻止氨直接释放到环境中<sup>[17]</sup>。

**1.2.1 吹脱制备硫酸铵肥效及市场需求。**前人大多关注吹脱法对畜禽粪便中养分的回收效率,而吹脱法和传统工艺合成的硫酸铵对作物增产效果比较的研究较少<sup>[18]</sup>。Szymanska等<sup>[18]</sup>利用盆栽试验,考察了回收肥料与传统化肥对粉质壤土和壤土中的玉米和草的增产效果。结果表明,与没有施肥的土壤相比,2种土壤中施用回收肥料的作物产量与施用传统化肥的产量无显著差异,Sigurnjak等<sup>[17]</sup>的研究结论也基本相似。此外,该研究结果表明回收的硫酸铵中的氮完全处于矿物形态(以 $\text{NH}_4^+$ 存在)而更易于被作物吸收。表明回收的硫酸铵可以替代作为作物种植肥料的工业硫酸铵,具有明显的经济和环境效益<sup>[18-19]</sup>。然而,经吹脱吸附反应生成的硫酸铵pH一般在3.0~7.5<sup>[20]</sup>。长期施用pH较低的肥料会导致烧苗及土壤酸化等问题,而pH过高则会导致施肥过程中 $\text{NH}_3$ 挥发导致氮素流失<sup>[21]</sup>。

由于畜禽粪便中含有重金属、抗生素等污染物,很多国家对来源于畜禽粪便肥料的生产使用有严格规定。厌氧消化可以去除畜禽粪污中大量污染物,从而使其达到施用标准,使包括畜禽废水在内的畜禽粪污的再利用成为一个新的经济机遇。如欧盟地区实施的“硝酸盐指令”(91/676/CEE)规定,即便经处理达标的源于畜禽粪便的硫酸铵(以氮质量计)施用量也不得高于170 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )<sup>[22]</sup>。在美国,根据自然资源保护署的保护规划政策和环境保护署(EPA)的指导方针起草的国家节能实践标准手册(National Handbook of Conservation Practice Standards, CNMPs)详细说明了农业废物的管理标准<sup>[23]</sup>。我国过度耕地使土壤中养分含量偏低,更需要施用包括畜禽粪便在内的有机肥料以补充土壤养分。然而,由于不同地区对有机肥料施用标准的差异,导致一些

地区包括畜禽废水在内的粪污不受控制地排放到环境中<sup>[24]</sup>。另一方面,废水中允许排放的铵离子浓度由《水污染物排放标准》规定(GB 13458—2001)<sup>[25]</sup>,而畜禽粪污处理的高成本限制了源于畜禽粪污的有机肥料的推广应用<sup>[26]</sup>。如市售硫酸铵溶液(浓度约30%)价格在700元/t左右,硫酸铵固体价格比溶液高,约为1000元/t。颗粒越大的硫酸铵价格越高,因为大颗粒硫酸铵由于其生产时所需的结晶工艺以及其他设备的运行维护而提高了生产成本。所以在初始资本成本、能源需求和工厂管理等方面来看,生产小尺寸(0.4~1.0 mm)硫酸铵晶体比大尺寸(2.6 mm)更加经济可持续。废水吹脱生产的硫酸铵可能会有有机污染物等杂质,影响其作为肥料的质量和值,所以在废水处理时一般会用生物滤膜去除废水中的有机物。另外,废水中硫酸铝等杂质会增加硫酸铵晶体的尺寸。这可能是由于晶体上杂质的吸附平衡不同造成的。然而,通过吹脱法等其他处理方法得到的硫酸铵成本高于传统

合成的氨肥料,其中后者一般是通过哈伯-博世工艺合成。虽然2种工艺的耗能差异不大[9~10 (kW·h)/kg],但吹脱工艺的维护成本要远远高于传统合成工艺<sup>[27]</sup>。

**1.2.2 吹脱法的工业化应用。**国内外畜禽废水的吹脱已有工业化应用。针对不同的处理对象(如沼液、工业废水、粪肥),采用的吹脱回收方案以及氨氮回收率有较大差异。虽然我国畜禽粪便处理厌氧消化工艺工业在不断发展,但针对各种粪污的前处理很少使用脱氮系统,而国外则比较重视粪污厌氧消化的前处理<sup>[28]</sup>。吹脱塔和填料塔是处理气液流(如酸性气体、醇类或溶剂)最常见的装置配置。在欧洲,很多企业针对处理粪污的性质及特征,提出了自己的专利系统,以更高效地回收粪污中的氨。如在对畜禽粪便厌氧消化前可利用AMFER系统进行富氮预处理,而废水中氨氮的减少可以提高畜禽粪便厌氧消化的速率;RECOV系统对氨的去除效率超过90%(表1)。

表1 国内外不同吹脱工艺的工业化应用

Table 1 Industrial application of different air stripping processes at home and abroad

国家/地区 Country/ Region	公司名称 Corporate name	废水类型 Wastewater type	相关技术信息及参数 Relevant technical information and parameters
美国 U.S.A	Branch Environmental Corporation	工业废水	封闭循环系统 排出的空气经过酸洗处理,与氨气反应生成盐,含氨空气在汽提器中往复循环,其处理速度可达681 m <sup>3</sup> /h。通过对废水进行类似于曝气的方式,实现废水中挥发性有机物的回收;填料塔用于吸收各种气体,如酸性气体、乙醇和氨气
欧盟 European union	Colsen (荷兰)	沼液/畜禽粪便	AMFER 从富含铵废物和废水中回收铵。无需脱水或废水预处理。气流通过废水废物,带走二氧化碳和NH <sub>3</sub> 并在汽提柱中富集,生成硫酸铵或硝酸铵
	GNS (德国)	沼液	ANAStrip <sup>®</sup> 该系统可产出相当于65%氮含量的矿质肥料并回收废水中的碳酸钙;同时从反应过程中回收热量。工艺参数为沼液输入速率为5.5~12.6 m <sup>3</sup> /h;NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 输入速率为3~6 g/L;硫酸铵产量为13~27 t/d;碳酸钙产量为4~8 t/d
	CMI Europe Environment (法国)	沼液	RECOV' AMMONIA <sup>TM</sup> 沼液中氨氮去除率大于92%;工艺参数为污染物浓度102 kg/h;NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 为2~4 g/L;沼液流量为42 m <sup>3</sup> /h,处理温度60℃,水pH为9;空气吹脱流量:80 000 m <sup>3</sup> /h
国内 Domestic	北京德青源农业科技股份有限公司(中国)	畜禽粪便	利用厌氧消化处理回收未经前处理鸡粪中的氨,其回收率达100%

近年来出现了循环闭式无填料沼液氨氮脱除技术<sup>[20]</sup>。该技术针对废水高悬浮物含量,实现了化学物质零添加情况下对废水的处理。但受运行成本的限制导致这些系统对氨氮的去除率较低。另外,前人已在实验室规模进行了改进型吹脱脱氮,其吹脱气提装置体积在0.75~5.00 L,且在回收体系中加入真空系统以提高气体吹脱效率<sup>[29-30]</sup>。

针对废水处理中填料塔的结垢问题,很多研究提出了不同的解决方案。李勇等<sup>[30]</sup>设计了一种水力喷射空气旋流器,与传统的空气环流系统相比,该系统在节能降耗和除尘效率方面更有优势。Degermenci等<sup>[31]</sup>设计的喷射环流反应器可以减少曝气过程中的能量需求。同时,即使减少进气量,由于其内部高效混合和更大接触面积等设计,使得该反应器的传质能力仍高于其他反应器,从而降低了结垢发生的可能性;Yuan等<sup>[32]</sup>在室温下使用了连续流旋转填料床,该系统能够在提高氨的去除效率减少处理时间的同时,可有效避

免填料塔的结垢问题。

好氧生物处理常与吹脱相结合处理畜禽粪便(图2)。Alitalo等<sup>[33]</sup>在无外源碱添加的情况下,通过好氧处理提高畜禽废水的pH,处理温度为35~37℃,经该处理后可去除水中30%以上的氨。向经预处理后的废水中加入MgO和Ca(OH)<sub>2</sub>进行吹脱气提循环后废水中氨的去除效率可达86%。处理猪废水的好氧菌种包括淀粉芽孢杆菌、蜡样芽孢杆菌、假单胞菌和某些放线菌<sup>[8]</sup>。Yang等<sup>[34]</sup>研究表明,两阶段厌氧消化时,第一阶段吹脱可增加产酸过程,为二阶段产甲烷过程作准备,说明酸原在产甲烷原的主要底物生成中起重要作用。

需要注意的是图2中列出的3种方法各有利弊。当吹脱法与微藻培养结合时(A),废水中过高的营养物质以及可能存在的重金属可能会抑制微藻的生长;利用厌氧消化处理养猪粪污时,若以吹脱法作为预处理(B),需要添加化学药

剂提高粪污 pH,且经吹脱后粪污中的营养物质可能不足以支撑接下来的厌氧消化过程;利用厌氧消化处理养猪粪污时,若以吹脱法作为后处理(C),沼气产气率较低,且厌氧消

化后的废水可能偏酸性,不利于吹脱法的应用,同时,废水中的有机物由于环境抑制作用导致降解不完全。

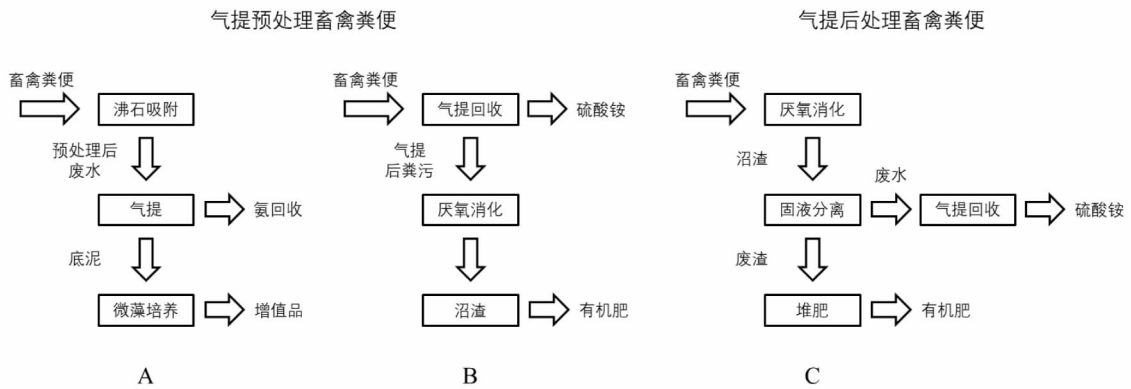


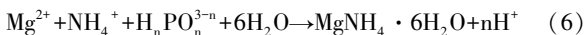
图2 吹脱法与微藻培养法结合(A)以及厌氧消化时吹脱法作为预处理(B)和后处理方式(C)处理畜禽废水流程

Fig.2 Treatment process of livestock wastewater by combination of air stripping method and microalgae culture method (A) and air stripping method during anaerobic digestion as pretreatment (B) and post-treatment (C)

吹脱法可以作为畜禽废水的预处理,也可以作为厌氧消化后剩余沼渣的后处理(图2)。吹脱对废水氨氮进行低成本回收的同时还提高了甲烷产量。当采用吹脱作为厌氧消化的预处理时,其主要目的是去除抑制产甲烷菌活性的氨化合物。在此情况下,在吹脱前应对调节废水初始 pH 的碱剂和类型进行评估,以避免由于阳离子毒性或过量脱氮而抑制下一步的厌氧消化<sup>[8]</sup>。此外,由于厌氧消化后的沼液中有有机物和氨化合物残留,需要对其进行进一步的好氧生物处理才能将其作为肥料使用。为了解决这一问题,吹脱法也可以应用于厌氧消化的后处理,以降低沼液中的氨和有机物浓度<sup>[35]</sup>。

因为可以将废水中的有机质可以转化为甲烷,所以厌氧消化同样可以看作是从废水中回收碳源的一种方式<sup>[36]</sup>。然而,废水中的高氨氮含量导致理论甲烷产量无法实现(约 380 mL/g COD)<sup>[37]</sup>。当吹脱与厌氧消化相结合时(图 2B、C),利用甲烷现场燃烧的方式产热可将废水加热至最佳吹脱温度<sup>[38]</sup>。在厌氧过程中参与消化的微生物主要包括甲烷粒菌、甲烷丝菌和甲烷杆菌<sup>[39]</sup>。Schroder 等<sup>[39]</sup>先利用鸟粪石沉淀法回收沼液中的磷和氮,然后利用曝气吹脱法回收出水中的硫酸铵。鸟粪石沉淀法可去除废水中 90%的可溶性磷酸盐和 30%的氨,废水中剩余的氨氮可以通过随后的吹脱回收,鸟粪石沉淀-吹脱技术可回收沼液中大部分的营养元素<sup>[40-41]</sup>。

采用鸟粪石沉淀法从废水中回收磷时,需要加入镁化合物(MgO 或 MgCl<sub>2</sub>)和 NaOH 以达到鸟粪石生成所需要的镁磷摩尔比和最优 pH(pH=10)。鸟粪石沉淀反应公式:



鸟粪石沉淀一般采用流化床或连续搅拌槽式反应器,搅拌可促进溶液的混合和沉淀的形成。然而,鸟粪石的纯度与沉淀工艺、镁化合物添加种类、沉淀温度、杂质离子含量和添加的碱性物质类型相关。微波辐射技术也可以通过缩短反应时间和降低活化能来提高吹脱过程中氨的去除率。研究表明,由于微波辐射可提高氨的传质速率,所以氨去除率比常规加热吹脱提高了 25%。曝气对氨去除的影响较小,而

pH、辐射时间和功率对吹脱效率影响较大<sup>[42]</sup>。

## 2 空气吹脱法在养猪沼液处理中的应用

尽管是生化处理的产物,但经厌氧消化的畜禽废水(即沼液)中氨氮浓度仍很高<sup>[43-44]</sup>。厌氧处理后的畜禽废水中有机磷和氮基本转化为磷酸盐和氨。由于沼液中大量氨的存在(300~3 000 mg/L),导致厌氧消化虽能产生沼气,但由于氨对微生物的抑制作用不能有效降低废水负荷<sup>[45]</sup>。现场沼气燃烧产热可提高废水温度以及 pH 调整不需要过多的投加外源碱,所以吹脱法比其他处理工艺更加经济可持续。另一方面,吹脱法也受到许多限制,如结垢导致设备堵塞,限制了其在填料床塔中的应用。因此,沼液在进行吹脱处理之前,一般要经过沉降或过滤等固液分离工艺<sup>[46-47]</sup>。

前人在实验室进行的小试所用的废水大部分是畜禽废水和其他基质(甘油、废油、食品加工或屠宰场废物等)混合厌氧发酵之后形成的沼液,而对单纯由畜禽废水厌氧发酵后的沼液处理较少<sup>[47-48]</sup>。与畜禽废水相比,利用吹脱法去除沼液中氨的反应时间(小于 24 h)更短,且沼液脱氮对 pH 的要求更低<sup>[17]</sup>。据报道,沼液 pH 为 9.5 时,通过吹脱后其中氨氮可以几乎完全去除,而当其 pH 为 11.5 时,脱氮效率并没有显著增加<sup>[49]</sup>。而温度对沼液脱氮效率影响较大:温度为 80 °C 时,氨氮去除率为 91%,而温度为 50 °C 时氨氮去除率仅为 75%<sup>[11]</sup>。而一些研究的结论则相反,如 Gustin 等<sup>[11]</sup>研究表明,pH 是沼液脱氮最重要的影响因素,而温度的影响最小。一般而言,沼液处理出水的 pH 在 9.0~10.0,而高碱度的出水在再利用之前需要进一步处理,如人工湿地或利用酸溶液中和。曝气空气流速对沼液脱氮效率影响较小。Lei 等<sup>[49]</sup>研究表明,沼液 pH 为 12.0 时,空气流速 1~5 L/min 对沼液中脱氮效率影响差异不显著,Gustin 等<sup>[11]</sup>也有相似的研究结论。

鸟粪石沉淀-吹脱联用是沼液快速去除氨磷最常见的方法。Cao 等<sup>[46]</sup>通过添加氧化镁沉淀鸟粪石,并调节 pH 对沼液剩余氨进行吹脱。研究表明最佳工艺条件为温度 40 °C,

氨去除率约为 90%, AFR 为 8 L/min, 反应时间为 3 h, MgO 添加量为 0.75 g/L。李勇等<sup>[30]</sup>在鸟粪石沉淀后利用水力喷射空气旋流器进行吹脱后, 添加 Ca(OH)<sub>2</sub> 沉淀废水中铵根离子和磷酸根离子, 同时氢氧化钙可通过调节剩余沼液 pH 进一步吹脱除氨, 该工艺可在 3 h 内使沼液氨去除率达 90% 以上。另一种吹脱-生物膜反应器结合使用可以使沼液氨去除率达 80%<sup>[46]</sup>。为了尽量降低处理成本, 应尽量避免或减少添加化学试剂。Lei 等<sup>[49]</sup>通过二氧化碳吹脱将沼液 pH 从 7.4 提高到 9.3 (二氧化碳流速为 2.5 L/min), 从而减少所需的碱添加量。然后对吹脱后的出水进行沼气注入, 以降低处理后沼液的 pH, 再进行后续生物处理, 同时对沼气进行净化。该工艺可在 30 min 内将出水 pH 从 11.0 降低到 7.0, 沼气中的甲烷含量提高了约 75%。Lin 等<sup>[44]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 吹脱提高废水 pH, 可通过鸟粪石沉淀回收废水中 85% 的磷酸盐, 氨氮去除率达 90%。

### 3 展望

对畜禽废水及其沼液进行曝气吹脱处理可将其转化为包括硫酸铵等在内的附加产物。吹脱与其他技术常见的组合系统包括鸟粪石沉淀以及吹脱作为厌氧消化的预处理或后处理, 吹脱与微生物(如微藻)的生产结合则比较少见。采用鸟粪石化学沉淀联合吹脱工艺制备硫酸铵对废水中磷和氨的回收是目前最普遍最经济的畜禽废水处理方法。废水厌氧消化时, 若采用吹脱作为预处理, 可以通过减少废水氨化合物含量提高甲烷产率; 若采用吹脱作为后处理, 则可以通过降低沼液氨氮含量使其更适合用作肥料, 然而该方面的应用需要未来更多的研究支撑。

除常见的 pH、温度、空气流量等参数外, 废水中有机质的存在对氨的去除效果也有重要影响。然而, 有机质怎样以及如何影响废水氨氮去除的机理目前仍不明确。因此, 未来的研究应围绕废水中的有机物对吹脱生产的氨盐产量及质量, 及其作为肥料在土地上施用农艺效应的影响等方面进行。

### 参考文献

- [1] 万风, 王海燕, 周岳溪, 等. 养猪废水处理技术研究进展[J]. 农业灾害研究, 2012, 2(1): 25-29.
- [2] 高红杰, 彭剑峰, 宋永会, 等. 铵饱和和天然钙型沸石基质人工湿地对模拟养猪废水的处理效能[J]. 环境保护科学, 2010, 36(6): 14-16, 34.
- [3] ZEMA D A, ANDILORO S, BOMBINO G, et al. Comparing different schemes of agricultural wastewater lagooning: Depuration performance and microbiological characteristics [J]. Water air & soil pollution, 2016, 227(12): 1-9.
- [4] 魏金山, 刘雪瑜, 刘晓玲, 等. 曝气与投加 NaOH 对养殖废水厌氧消化液磷回收的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2265-2272.
- [5] 沈阳, 王电站, 周立祥. 倒置 A<sup>2</sup>/O 池容比对猪场消化液脱氮除磷的影响[J]. 水处理技术, 2020, 46(3): 119-123.
- [6] ZEMA D A, CALABRO P S, FOLINO A, et al. Wastewater management in citrus processing industries: An overview of advantages and limits [J]. Water, 2019, 11(12): 1-23.
- [7] 张丽萍, 孙国峰, 盛婧, 等. 养猪舍不同发酵床垫料碳素流向及二氧化碳与甲烷排放初探[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1247-1253.
- [8] BROWNE J D, ALLEN E, MURPHY J D. Evaluation of the biomethane potential from multiple waste streams for a proposed community scale anaerobic digester [J]. Environmental technology, 2013, 34(13/14): 2027-2038.
- [9] SENGUPTA S, NAWAZ T, BEAUDRY J. Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater [J]. Current pollution reports, 2015, 1(3): 155-166.
- [10] PERERA M K, ENGLEHARDT J D, DVORAK A C. Technologies for re-

- covering nutrients from wastewater: A critical review [J]. Environmental engineering science, 2019, 36(5): 511-529.
- [11] GUSTIN S, MARINSEK-LOGAR R. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent [J]. Process safety & environmental protection, 2011, 89(1): 61-66.
- [12] 段跟定, 张胜利. UASB-曝气吹脱-混凝-一段 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.
- [13] KARRI R R, SAHU J N, CHIMMIRI V. Critical review of abatement of ammonia from wastewater [J]. Journal of molecular liquids, 2018, 261: 21-31.
- [14] SARACCO G, GENON G. High temperature ammonia stripping and recovery from process liquid wastes [J]. Journal of hazardous materials, 1994, 37(1): 191-206.
- [15] MEHTA C M, KHUNJAR W O, NGUYEN V, et al. Technologies to recover nutrients from waste streams: A critical review [J]. Critical reviews in environmental science & technology, 2015, 45(4): 385-427.
- [16] LAURENI M, PALATSI J, LLOVERA M, et al. Influence of pig slurry characteristics on ammonia stripping efficiencies and quality of the recovered ammonium-sulfate solution [J]. Journal of chemical technology & biotechnology, 2013, 88(9): 1654-1662.
- [17] SIGURNJAK I, BRIENZA C, SNAUWAERT E, et al. Production and performance of bio-based mineral fertilizers from agricultural waste using ammonia (stripping-) scrubbing technology [J]. Waste management, 2019, 89(4): 265-274.
- [18] SZYMAŃSKA M, SOSULSKI T, SZARA E, et al. Ammonium sulphate from a bio-refinery system as a fertilizer—Agronomic and economic effectiveness on the farm scale [J]. Energies, 2019, 12: 335-364.
- [19] VANECKHAUTE C, LEBUF V, MICHELS E, et al. Nutrient recovery from digestate: Systematic technology review and product classification [J]. Waste and biomass valorization, 2017, 8(1): 21-40.
- [20] VANECKHAUTE C, MEERS E, MICHELS E, et al. Ecological and economic benefits of the application of bio-based mineral fertilizers in modern agriculture [J]. Biomass & bioenergy, 2013, 49(2): 239-248.
- [21] ARAGAY G, PONS J, MERKOÇI A. Recent trends in macro-, micro-, and nanomaterial-based tools and strategies for heavy-metal detection [J]. Chemical reviews, 2011, 111(5): 3433-3458.
- [22] GUO G L, ZHOU Q X, MA L Q. Availability and assessment of fixing additives for the *in situ* remediation of heavy metal contaminated soils: A review [J]. Environmental monitoring & assessment, 2006, 116(1/2/3): 513-528.
- [23] 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.
- [24] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 合成氨工业水污染物排放标准: GB 13458—2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [25] 马世豪, 何星海. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》浅释 [J]. 给水排水, 2003, 29(9): 89-94, 101.
- [26] MAURER M, SCHWEGLER P, LARSEN T A. Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery [J]. Water science & technology, 2003, 48(1): 37-46.
- [27] 白晓凤, 李子富, 王琦, 等. 大型沼气工程沼液蒸发浓缩的能量平衡分析 [J]. 中国沼气, 2019, 37(3): 56-63.
- [28] CAO L P, WANG J J, ZHOU T, et al. Evaluation of ammonia recovery from swine wastewater via a innovative spraying technology [J]. Biore-source technology, 2019, 217: 235-240.
- [29] TAO W D, UKWUANI A T, AGYEMAN F. Recovery of ammonia in anaerobic digestate using vacuum thermal stripping-acid absorption process: Scale-up considerations [J]. Water science & technology, 2018, 78(4): 878-885.
- [30] 李勇, 程治良, 全学军, 等. 水力喷射空气旋流器吹脱处理挥发性有机物废水 [J]. 现代化工, 2019, 39(9): 176-180.
- [31] DEGERMENCİ N, ATA O N, YILDI Z E. Ammonia removal by air stripping in a semi-batch jet loop reactor [J]. Journal of industrial & engineering chemistry, 2012, 18(1): 399-404.
- [32] YUAN M H, CHEN Y H, TSAI J Y, et al. Removal of ammonia from wastewater by air stripping process in laboratory and pilot scales using a rotating packed bed at ambient temperature [J]. Journal of the Taiwan institute of chemical engineers, 2016, 60: 488-495.
- [33] ALITALO A, KYRÖ A, AURA E. Ammonia stripping of biologically treated liquid manure [J]. Journal of environmental quality, 2012, 41(1): 273-280.

- Press, 2005, 311-319.
- [19] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010, 5.
- [20] MAKHZOUMI J M. Landscape ecology as a foundation for landscape architecture: Application in Malta [J]. Landscape & urban planning, 2000, 50(1/2/3): 167-177.
- [21] 胡巍巍, 王根绪, 邓伟. 景观格局与生态过程相互关系研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27(1): 18-24.
- [22] 朱槐文, 孟庆香, 宋二红, 等. 景观格局—生态过程研究进展[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(1): 211-214.
- [23] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [24] WU J G. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes [J]. Landscape ecology, 2013, 28(6): 999-1023.
- [25] TERMORSHUIZEN J W, OPDAM P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development [J]. Landscape ecology, 2009, 24(8): 1037-1052.
- [26] 范昊, 赵文武, 丁婧祎. 连接景观异质性与社会环境系统: 2017年美国景观生态学年会(The US-IALE 2017 Annual Meeting)会议述评[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4919-4922.
- [27] 李琰, 李双成, 高阳, 等. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架[J]. 地理学报, 2013, 68(8): 1038-1047.
- [28] TERMORSHUIZEN J W, OPDAM P, VAN DEN BRINK A. Incorporating ecological sustainability into landscape planning [J]. Landscape & urban planning, 2007, 79(3/4): 374-384.
- [29] 于沁沁. 寻踪—生态主义思想在西方近现代风景园林中的产生、发展与实践[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [30] 岳邦瑞. 图解景观生态规划设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [31] COLLINS J P, KINZIG A, GRIMM N B, et al. A new urban ecology [J]. American scientist, 2000, 88(5): 416-425.
- [32] LEITÃO A B, AHERN J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning [J]. Landscape & urban planning, 2002, 59(2): 65-93.
- [33] 伊恩·伦诺克斯·麦克哈格. 设计结合自然[M]. 黄经纬, 译. 天津: 天津大学出版社, 2008.
- [34] 福斯特·恩杜比斯. 生态规划历史比较与分析[M]. 陈蔚镇, 王云才, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [35] KATO S, AHERN J. 'Learning by doing': Adaptive planning as a strategy to address uncertainty in planning [J]. Journal of environmental planning and management, 2008, 51(4): 543-559.
- [36] 王志芳. 生态实践智慧与可实践生态知识[J]. 国际城市规划, 2017, 32(4): 16-21.
- [37] 王志芳, 李明翰. 如何建构风景园林的“设计科研”体系? [J]. 中国园林, 2016, 32(4): 10-15.
- [38] XIANG W N. *Ecophronesis*: The ecological practical wisdom for and from ecological practice [J]. Landscape and urban planning, 2016, 155: 53-60.
- [39] XIANG W N. Doing real and permanent good in landscape and urban planning: Ecological wisdom for urban sustainability [J]. Landscape & urban planning, 2014, 121: 65-69.
- [40] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 等. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [41] 俞孔坚, 李迪华. 景观设计: 专业学科与教育[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [42] 李际. 生态学假说判决性实验的验证方法[J]. 科技导报, 2016, 34(13): 93-98.
- [43] KNIGHT A T, COWLING R M, CAMPBELL B M. An operational model for implementing conservation action [J]. Conservation biology, 2006, 20(2): 408-419.

(上接第 17 页)

- [34] YANG K, OH C, HWANG S. Optimizing volatile fatty acid production in partial acidogenesis of swine wastewater [J]. Water science & technology, 2004, 50(8): 169-176.
- [35] 周琪, 陈银广, 李咏梅. 污水厂剩余污泥的资源化利用——污水厂剩余污泥中的碳、氮、磷回收与资源化利用的研究进展[J]. 流程工业, 2012(8): 36-38.
- [36] HEIDRICH E S, CURTIS T P, DOLFING J. Determination of the internal chemical energy of wastewater [J]. Environmental science & technology, 2011, 45(2): 827-832.
- [37] 陈振民. 提高厌氧处理甲烷生成量方法的初步探讨[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004(5): 43-47.
- [38] 翟一帆, 袁青彬, 胡南. 养猪废水处理系统微生物群落结构变化及影响因素研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 88-94.
- [39] SCHRÖDER J J, UENK D, HILHORST G J. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland [J]. Plant & soil, 2007, 299(1/2): 83-99.
- [40] LE CORRE K S, VALSAMI-JONES E B, HOBBS P C, et al. Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review [J]. Critical reviews in environmental science & technology, 2009, 39(6): 433-477.
- [41] LA J, KIM T Y, JANG J K, et al. Ammonia nitrogen removal and recovery from swine wastewater by microwave radiation [J]. Environmental engineering research, 2014, 19(4): 381-385.
- [42] 宋小燕, 刘锐, 税勇, 等. 间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 [J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1873-1879.
- [43] 袁鹏, 宋永会, 袁芳, 等. 磷酸铵镁结晶法去除和回收养猪废水中营养元素的实验研究 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1127-1134.
- [44] LIN H J, LIN Y Q, WANG D H, et al. Ammonium removal from digested effluent of swine wastewater by using solid residue from magnesium-hydroxide flue gas desulfurization process [J]. Journal of industrial & engineering chemistry, 2018, 58: 148-154.
- [45] 巫小丹, 岑庆静, 吴冬梅, 等. 猪场沼液高值化综合利用研究进展及前景分析 [J]. 中国沼气, 2019, 37(2): 69-74.
- [46] CAO L P, WANG J J, XIANG S Y, et al. Nutrient removal from digested swine wastewater by combining ammonia stripping with struvite precipitation [J]. Environmental science and pollution research, 2019, 26(7): 6725-6734.
- [47] QUAN X J, YE C Y, XIONG Y Q, et al. Simultaneous removal of ammonia, P and COD from anaerobically digested piggery wastewater using an integrated process of chemical precipitation and air stripping [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 178(1/2/3): 326-332.
- [48] BONMATÍ A, FLOTATS X. Air stripping of ammonia from pig slurry: Characterisation and feasibility as a pre-or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion [J]. Waste management, 2003, 23(3): 261-272.
- [49] LEI X H, SUGIURA N, FENG C P, et al. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification [J]. Journal of hazardous materials, 2007, 145(3): 391-397.