

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.029

氨吹脱与酸吸收一体酒糟沼液处理试验装置研究

柳珊^{1,2} 刘晟¹ 郭宝寿¹ 张自强³ 何荣玉³ 董仁杰¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670;

3. 中节能绿碳环保有限公司, 北京 100055)

摘要: 针对酒糟沼液氨氮浓度高, 采用氨吹脱技术回收氮养分存在碱剂利用率低、气液接触效果差和氨吸收率低等问题。为提高酒糟沼液氨回收效率和工艺经济性, 对酒糟沼液氨吹脱工艺进行了条件优化, 探索了不同温度、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和填料种类对氨吹脱与酸吸收一体试验装置运行效果的影响, 并进行了酒糟沼液氨吹脱工艺经济性评价。结果表明, 经正交试验得到影响因素重要性由强到弱依次为: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量、气流量、温度, 较优工艺参数组合为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 6.6 g/L、气流量 6 L/min 和温度 52℃, 相应的氨氮去除率为 99.0%; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对 SCOD 和 TP 有较好的去除效果, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 6.6 g/L 条件下对应的 SCOD 和 TP 去除率分别为 32.5% 和 65.7%。氨吹脱与酸吸收一体试验中, 相对于不投碱情景, 投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 大幅提高了吹脱过程中氨氮、TN、EC、SCOD 和 TP 去除率, 分别达 97.4%~97.7%、79.8%~84.2%、68.3%~77.4%、36.8%~45.3% 和 77.1%~91.0%。对比不同温度、填料种类和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量条件下, 获得较适宜氨吹脱参数为多面空心球填料、温度 37℃、两次(吹脱 8 h 投 9.9 g/L 和 30 h 投 7.4 g/L)投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 其氨氮去除率达到了 97.4%, 出水氨氮质量浓度低(100 mg/L 左右), 氨回收量达 1.22 kg/m³。对氨吹脱与酸吸收一体试验装置处理酒糟沼液工艺运行进行比较, 相比于不投碱和一次投碱情景, 两次投碱方案达到 97% 氨氮去除率需要的工艺运行时间短, 处理成本为 9.75 元/m³, 具有较好的经济性。因此, 氨吹脱对于高氨氮浓度的酒糟沼液处理体现出较好的适宜性, 通过氨吹脱高效回收氮养分可缓解沼液农田利用压力, 对沼液资源化利用具有重要意义。

关键词: 酒糟沼液; 氨氮吹脱; 酸吸收; 经济性评价

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0249-11

Ammonia Stripping and Acid Absorption Integrated Test Device for Vinasse Slurry Treatment

LIU Shan^{1,2} LIU Sheng¹ GUO Baoshou¹ ZHANG Ziqiang³ HE Rongyu³ DONG Renjie¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China

3. CECEP Green Carbon Environment Protection, Beijing 100055, China)

Abstract: The ammonia nitrogen concentration in vinasse slurry is high, and the use of ammonia stripping technology to recover nitrogen nutrients has problems such as low utilization rate of alkali agent, poor gas-liquid contact effect and low ammonia absorption effect. In order to improve the ammonia recovery efficiency and process economy of vinasse slurry, the conditions of the vinasse slurry ammonia stripping process were optimized, and the effects of different temperatures, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dosage and filler types on ammonia stripping and acid absorption were explored. The influence of the operation effect of the integrated test device was evaluated, and the economical evaluation of the ammonia stripping process from the vinasse slurry was carried out. The results showed that the order of importance of influencing factors was obtained by orthogonal test was alkali dosage, air flow and temperature. The optimal process parameter combination was $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dosage of 6.6 g/L, gas flow of 6 L/min and at a temperature of 52℃, the corresponding ammonia nitrogen removal rate was 99.0%; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ had a good removal effect on SCOD and TP, and the corresponding SCOD and TP removal rates were 32.5% and 65.7%

收稿日期: 2022-06-28 修回日期: 2022-08-21

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE240)

作者简介: 柳珊(1985—), 女, 副教授, 博士, 主要从事生物有机废弃物资源化利用研究, E-mail: liu610shan@cau.edu.cn

通信作者: 董仁杰(1964—), 男, 教授, 主要从事沼气工程及其环境影响评价研究, E-mail: rjdong@cau.edu.cn

under the condition of 6.6 g/L alkali dosage. The addition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ compared with the plan without alkali significantly improved the removal rates of ammonia nitrogen, TN, EC, SCOD and TP in the stripping process, reaching 97.4% ~ 97.7%, 79.8% ~ 84.2%, 68.3% ~ 77.4%, 36.8% ~ 45.3% and 77.1% ~ 91.0%, respectively. The suitable ammonia stripping parameters are hacketten filler 37°C and twice adding $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The ammonia nitrogen removal rate reaches 97.4%, the effluent ammonia nitrogen concentration is as low as about 100 mg/L, and the ammonia recovery amount reaches 1.22 kg/m³. Compared with the scenario of no alkali addition and one-time alkali addition, the ammonia nitrogen removal rate can exceed 97% in the two-time alkali addition process scenario. The effluent ammonia nitrogen concentration was low (about 100 mg/L), and the treatment cost was 9.75 yuan/m³, which had a relatively good economy. Therefore, ammonia stripping had good suitability for the treatment of scenario with high ammonia nitrogen concentration. The efficient recovery of nitrogen nutrients through ammonia stripping can relieve the pressure of biogas slurry farmland utilization, which was of great significance for the resource utilization of biogas slurry.

Key words: vinasse slurry; ammonia stripping; acid absorption; economic evaluation

0 引言

酒糟是高粱、大麦、米等酿酒后形成的副产物。2021年我国酒产量超过 4.32×10^7 t,按酒糟产量与酒产量比例为 3:1 ~ 8:1 计,我国酒糟年产量超过 $1.30 \times 10^8 \sim 3.46 \times 10^8$ t^[1-2]。酒糟中有机物占 40.2% ~ 44.5%,粗蛋白含量高,可作为蛋白饲料或者沼气生产原料^[3]。贵州某大型沼气工程采用厌氧消化技术年处理 1.0×10^5 t 酒糟与 5×10^4 t 高浓度废水,产生的沼液具有高氨氮、高有机物等特性。当前,沼气工程沼液消纳主要有 2 种途径^[4],一是沼液作为有机肥料直接农田利用,但存在运输成本高、需要足够的土地消纳等问题无法有效实施;二是沼液进行深化处理达标排放的方式,但是经济成本高且产生的污泥还需要进一步资源化处理和利用。因此,沼液的处理与利用是当前沼气行业面临的痛点,严重制约沼气工程的可持续发展。

废水养分回收技术主要有氨吹脱、微藻生物利用^[5-6]、磷酸铵镁等方法,其中氨吹脱是较为经济且高效的技术,是在曝气、碱性条件下通过气液传质原理将废水中的 NH_4^+ -N 转化为游离态的 NH_3 分子并将其用酸吸收,从而达到脱除废水中氨氮和养分回收目的的技术^[7]。氨氮吹脱效率主要受温度、初始 pH 值和气液比等因素影响;同时,废水理化性质及氨吹脱反应器设计与类型也对脱氮效果产生较大影响^[8]。目前,氨吹脱主要用于处理低氨氮浓度的废水或沼液,对于高氨氮浓度沼液(大于 2 000 mg/L)

的氨吹脱研究较少^[9];另外,碱剂投加是提高氨吹脱效率的有效途径之一,常用的碱剂有 NaOH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,NaOH 调节 pH 值效率高,但成本也高,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 具有成本低的优势,但存在着溶解度低、不易调节 pH 值、易堵塞反应器的局限性,本课题组前期为克服 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解度低、碱剂利用率低的问题,提出采用湿法投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^[10] 能够减少投碱量,减少药剂成本;最后氨吹脱反应器存在气液接触效果差和氨吸收效果低等问题,并且氨氮吹脱的经济性限制了其产业化应用。

本文采用氨吹脱与酸吸收一体试验装置处理高氨氮浓度酒糟沼液,通过批式试验对氨吹脱主要影响因素温度、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和气流量进行工艺条件优化,研究氨吹脱与酸吸收一体试验装置中温度、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和填料种类对酒糟沼液氨吹脱运行效果的影响,并对不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量情景下的酒糟沼液氨氮吹脱工艺经济性进行评价,以期对沼液的资源化处理和沼液氮养分回收技术的推广应用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 酒糟沼液原料

酒糟沼液取自于贵州省遵义市某酒糟沼气工程,该沼气工程采用中温全混式厌氧发酵系统,沼液为酒糟发酵剩余物固液分离后的液体,取回后储存于 4°C 的冷库中备用。沼液的原料特性如表 1 所示。

表 1 酒糟沼液原料特性

Tab.1 Characteristics of vinasse slurry raw materials

参数	pH 值	TS/%	VS/TS	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	NH_4^+ -N/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SCOD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
数值	8.23 ± 0.07	5.07 ± 0	71.20	30 320 ± 49	5 314 ± 179	6 025 ± 209	52 700 ± 898	29 075 ± 2 494	555 ± 30

1.2 试验处理

1.2.1 酒糟沼液氨吹脱条件优化

该试验包括单因素试验和正交试验两部分, 主要对氨吹脱影响因素 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量、温度和气流量进行优化。单因素试验在有效容积为 1.5 L 玻璃瓶(总体积 2 L)中进行, 利用恒温水浴锅进行加热并控制温度, 通过气泵调节气流量进行曝气, 使用 1 mol/L 的硫酸作为酸吸收液, 酸吸收瓶有效容积为 1 L。① 温度为影响因素的单因素试验中, 结合沼气工程类型(常温、中温和高温)对温度要求的范围, 以及沼液等余热利用可减少维持温度所需热量的额外投入, 本试验设定沼液氨吹脱温度梯度为 25、37、52℃, 气泵曝气流量为 1 L/min, 起始 pH 值为 8.17(不投加碱), 曝气吹脱时间为 72 h。② $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为影响因素的单因素试验中, 以不投加碱为对照组, 酒糟沼液曝气 48 h 后投加不同梯度 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节 pH 值, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量分别为 2.6、6.6、9.2、11.9 g/L, 使得沼液 pH 值分别提升到 9.5、10.5、11.5 和 12.5, 随后在 37℃ 和 1 L/min 气流量下吹脱 24 h。③ 气流量为影响因素的单因素试验中, 设置气流量为 0.5、1、1.5、3、4.5、6 L/min 6 个梯度, 沼液在 37℃ 和初始 pH 值 8.17(不加碱)条件下吹脱 72 h。以上所有处理设置 3 个重复, 每隔 12 h 取样 20 mL 用于测定 NH_4^+-N 、TN、SCOD 和 TP 浓度。

根据单因素试验结果确定三因素三水平的正交试验, 试验设计见表 2, 吹脱时间 72 h, 试验过程中每隔 12 h 取样 20 mL 用于测定 NH_4^+-N 、TN、SCOD 和 TP 浓度。

表 2 酒糟沼液氨吹脱正交试验设计

Tab. 2 Orthogonal experimental design of ammonia nitrogen stripping for vinasse slurry

水平	因素		
	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 A/(g·L ⁻¹)	气流量 B/(L·min ⁻¹)	温度 C/℃
1	2.6	3.0	25
2	6.6	4.5	37
3	9.2	6.0	52

1.2.2 酒糟沼液处理试验

氨吹脱与酸吸收一体试验装置可实现氨氮吹脱同步酸吸收, 且沼液循环回流吹脱提高运行效率。该氨氮吹脱与酸吸收一体试验装置主要由 3 部分组成: 曝气室、酸吸收室和外接部分。试验装置的整体结构如图 1 所示, 曝气室与酸吸收室呈一体上下安装, 曝气室从上到下依次装有液体分布器、带孔隔板、填料层(上)、曝气盘(上)、集液分布器、填料层(下)和曝气盘(下), 曝气室与酸吸收室通过一根出

气管连接; 酸吸收室内装有中间隔板、酸入口、出气口以及铵盐排放口, 酸吸收室的底板通过法兰与曝气室连接; 曝气室底部是一圆盘底座以保证试验装置的稳定性, 外面有循环水层, 通过热水循环实现控制反应器温度, 曝气室侧面与 2 个填料层顶部连接处均装有螺旋柱塞便于装填料, 曝气室外面贴有保温棉以减少散热。试验装置的外接部分包括气泵、蠕动泵、储液桶、气体玻璃转子流量计、循环水泵、恒温水浴锅以及气液管路。

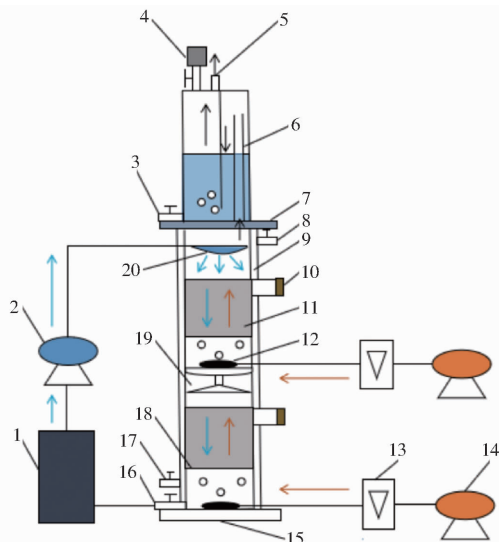


图 1 氨氮吹脱试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of ammonia nitrogen stripping test device

1. 储液桶 2. 蠕动泵 3. 铵盐排放口 4. 酸入口 5. 气体出口
6. 出气管 7. 法兰 8. 热水出口 9. 循环水层 10. 螺旋柱塞
11. 填料层 12. 曝气盘 13. 气体流量计 14. 气泵 15. 圆盘底座
16. 出水口 17. 热水入口 18. 带孔隔板 19. 集液分布器
20. 液体分布器

具体氨吹脱装置工作流程为: 沼液通过蠕动泵输送到液体分布器并向下喷淋, 在曝气室中与气泵输送进来的空气进行逆流接触, 吹脱一段时间后, 向沼液中投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节 pH 值并继续吹脱, 产生的氨气不断随着气流进入酸吸收室被硫酸吸收, 吹脱后的沼液经出水口通过管路再次流回储液桶中进行循环吹脱。

该试验分别研究温度、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和填料种类对酒糟沼液氨吹脱运行效果的影响, 沼液处理量为 6 L, 先通过离心处理沼液以防止堵塞填料。温度主要考虑实际沼气工程运行温度(37℃ 和 52℃), 由于沼液中 pH 值和 CO_2 质量浓度在曝气吹脱至 8 h 左右分别趋于稳定值和 0 mg/L, 可在 8 h 以后设置 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和投加次数, 填料选用多面空心球、鲍尔环和流化床。具体试验方案如表 3 所示, 试验过程中测定不同运行参数下的氨氮去除效果以及分析吹脱后沼液 SCOD、TP、EC 值等的变化情况, 每次

表3 氨吹脱与酸吸收一体试验装置处理酒糟沼液试验设计

Tab.3 Experimental design of ammonia stripping and acid absorption integrated device for vinasse slurry treatment

试验参数	试验条件					
	初始氨氮浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	气流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加次数 (对应 pH 值 10.5)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加 总量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	填料种类
温度	5 353	24	37,52	1	6.6	多面空心球
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量	5 353	24	37	1	9.9	多面空心球
				2	17.3	
填料种类	5 353	24	37	2	17.3	多面空心球、流化床、鲍尔环

试验进行3次重复。

1.3 理化指标测试及分析方法

pH 值采用 Orion 5-Star 型 pH 计测定;TS、VS 采用重量法检测;EC 采用电导仪测定; NH_4^+ -N 采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)测定;TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)测定;COD、SCOD 采用快速消解分光光度法测定;TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定。

氨氮去除率 η 计算式为

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 C_0 ——吹脱前初始氨氮质量浓度, mg/L

C_t —— t 时刻剩余氨氮质量浓度, mg/L

其他指标,如 TN、SCOD 和 TP 的去除率参照式(1)计算。

氨吸收效果通过计算氨氮回收率来确定,氨氮回收率计算式为

$$w = \frac{V_a(C_2' - C_1')}{V_b(C_1 - C_2)} \times 100\% \quad (2)$$

式中 w ——氨氮回收率, %

V_b ——吹脱沼液体积, L

V_a ——硫酸溶液体积, L

C_1 ——吹脱前沼液初始氨氮质量浓度, mg/L

C_2 ——吹脱后沼液剩余氨氮质量浓度, mg/L

C_1' ——硫酸溶液初始氨氮质量浓度, mg/L

C_2' ——酸吸收后氨氮质量浓度, mg/L

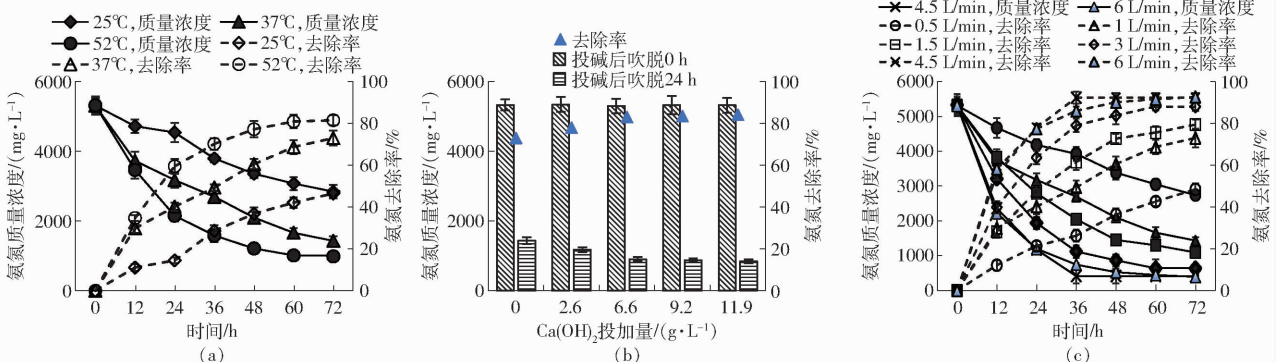
图2 温度、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和气流量对氨氮去除的影响

Fig.2 Effects of temperature, alkali dosage and gas flow on ammonia nitrogen removal

1.4 数据分析方法

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 处理并制图,采用 SPSS 统计软件对数据进行显著性分析。

2 试验与结果分析

2.1 酒糟沼液氨吹脱工艺条件优化

2.1.1 温度、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和气流量对氨吹脱的影响

在温度分别为 25、37、52 $^{\circ}\text{C}$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 0 g/L 和气流量为 1 L/min 条件下,由图 2a 可知,氨氮去除率随着温度的升高而增大,温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 37 $^{\circ}\text{C}$ 时,氨氮去除率显著增加 ($P < 0.05$),而温度从 37 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 52 $^{\circ}\text{C}$ 时,氨氮去除率有所提升,氨吹脱 72 h 后氨氮去除率由 73% 提高至 81.5%。试验结果表明提高温度能有效促进氨氮去除效果,主要由于 NH_4^+ 的解离反应是一个吸热过程,提高温度可以促进 NH_4^+ 向游离态氨的转化;同时一定压力下,氨分子在水中的溶解度会随着温度的升高而降低^[11]。然而,当温度继续从 37 $^{\circ}\text{C}$ 提高到 52 $^{\circ}\text{C}$ 氨吹脱促进效果不显著 ($P > 0.05$),主要是由于氨氮的解离速率随着温度或 pH 值升高而逐渐趋于平衡^[12]。现有文献也有类似的报道,隋倩雯等^[13] 通过试验发现猪场沼液温度从 30 $^{\circ}\text{C}$ 提高至 50 $^{\circ}\text{C}$,氨氮去除率提高 7.69%;龚川南等^[14] 也发现奶牛养殖场沼液温度从 30 $^{\circ}\text{C}$ 提高至 40 $^{\circ}\text{C}$,氨氮去除率仅提高

5.5%。另外,随着氨吹脱温度的提高,需要大量的能量投入并显著增加成本^[13,15]。因此,实际工程中需要综合考虑氨吹脱效率和能耗投入进行温度选择。

在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量分别为 0、2.6、6.6、9.2、11.9 g/L,温度 37℃ 和气流量为 1 L/min 条件下,由图 2b 可知, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量由 0 增加到 6.6 g/L,氨氮去除率增加较显著 ($P < 0.05$),而当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量由 6.6 g/L 增加到 9.2 g/L 时,氨氮去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 6.6 g/L 对应的 pH 值为 10.5,酒糟沼液氨氮去除率为 83%,这一结果与 HASAR 等^[16]采用氨吹脱工艺处理垃圾渗滤液试验结果相一致,氨氮去除率随着 pH 值的升高而增加,调节 pH 值分别为 10、11 和 12 时获得的氨氮去除率分别达到 76.4%、90.6% 和 93.2%,得到 pH 值为 10.5 左右是较适于氨氮吹脱的结论一致。由此可见,该试验选取对应调节 pH 值至 10.5 的 6.6 g/L $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为较适投碱量。

在气流量分别为 0.5、1、1.5、3、4.5、6 L/min, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 0 g/L 和温度 37℃ 条件下,由图 2c 可知,气流量从 0.5 L/min 增加到 4.5 L/min,氨氮去除率增加较显著 ($P < 0.05$),而当气流量由 4.5 L/min 增加到 6 L/min 时,氨氮去除率差异不显著 ($P > 0.05$),这表明增大气流量能有效促进氨氮去除,但到 4.5 L/min 以上促进效果不再显著。该结果与其他的氨吹脱研究有可比性,金明军^[17]在持续搅拌情况下,进行厌氧消化液氨氮吹脱影响因素研究,得到较适气流量为 4.5 L/min。该试验综合考虑经济性,确定较适宜的气流量为 4.5 L/min。

2.1.2 氨吹脱影响因素重要性分析

基于单因素试验结果,分别选取 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量、气流量和温度 3 个影响因素在较优工艺参数附近的 3 个水平值进行三因素三水平的正交试验以得到工艺参数的重要性排序和最优的工艺组合。

由表 4 极差 R 可以确定各因素的重要性由强到弱依次为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量、气流量、温度。这与 GUSTIN 等^[18]研究结论一致。

表 5 不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量试验中沼液 SCOD、TP 浓度的变化 (37℃, 1 L/min)

Tab. 5 Changes of SCOD and TP concentrations of biogas slurry in different alkali dosage experiments (37℃, 1 L/min)

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量/ (g·L ⁻¹)	吹脱前		吹脱后		SCOD 去除率/%	TP 去除率/ %
	SCOD/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	SCOD/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)		
0	29 075 ± 2 494	555 ± 30	(28 348 ± 2 326) ^a	(546 ± 23) ^a	2.5 ^a	1.6 ^a
2.6	28 760 ± 2 480	543 ± 45	(24 820 ± 1 685) ^b	(356 ± 19) ^b	13.7 ^b	34.5 ^b
6.6	29 103 ± 1 695	565 ± 35	(19 644 ± 1 842) ^c	(194 ± 15) ^c	32.5 ^c	65.7 ^c
9.2	29 350 ± 2 755	532 ± 26	(18 402 ± 1 653) ^c	(143 ± 11) ^c	37.3 ^c	73.1 ^c
11.9	28 535 ± 1 844	577 ± 41	(17 064 ± 1 644) ^c	(129 ± 22) ^c	40.2 ^c	77.6 ^c

注:不同字母 a、b、c 表示显著差异 ($P < 0.05$);相同字母表示无显著性差异 ($P > 0.05$)。

表 4 正交试验氨氮极差分析

Tab. 4 Orthogonal test ammonia nitrogen range analysis

试验号	因素			氨氮去除 率/%
	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量	气流量	温度	
1	1	1	1	81.8 ± 4.09
2	1	2	2	87.2 ± 5.23
3	1	3	3	98.8 ± 3.95
4	2	1	2	95.3 ± 6.67
5	2	2	3	97.2 ± 3.89
6	2	3	1	94.3 ± 4.71
7	3	1	3	93.1 ± 5.59
8	3	2	1	97.8 ± 6.85
9	3	3	2	94.8 ± 5.69
K_1	267.8	270.2	273.9	
K_2	286.8	282.2	277.3	840.3
K_3	285.7	287.9	289.1	
k_1	89.3	90.1	91.3	
k_2	95.6	94.1	92.4	93.4
k_3	95.2	96.0	96.4	
R	6.3	5.9	5.1	

各因素的水平选择是根据表 4 中每个因素 k_1 、 k_2 、 k_3 的最大水平,故可得出最优组合为: $A_2B_3C_3$,即对应参数为: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 6.6 g/L、气流量 6 L/min 和温度 52℃,该条件下氨氮去除率为 99.0%。

2.1.3 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加对氨吹脱 SCOD、TP 的影响

不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量对 37℃ 下曝气 1 L/min 的吹脱试验过程中 SCOD、TP 浓度的变化如表 5 所示。随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量的增加,SCOD、TP 去除率逐渐升高, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 6.6 g/L 时趋于稳定, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量在 6.6 ~ 11.9 g/L 时,SCOD、TP 去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。较佳 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 6.6 g/L 时对应的 SCOD、TP 去除率分别为 32.5% 和 65.7%。在氨氮吹脱过程中加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对沼液具备混凝作用,其混凝作用主要是通过压缩沼液中胶体微粒的双电层,使得沼液中的有机物、悬浮物等产生凝聚、絮凝沉淀的现象,从而将它们去除^[19];同时在碱性条件下, Ca^{2+} 与 PO_4^{3-} 形成羟基磷酸钙($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$)沉淀,去除沼液中的磷^[20]。

该结果与其他的氨吹脱研究有可比性,金要勇^[21]在氨吹脱处理奶牛场养殖废水时发现,在最佳 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 4.5 g/L 时,pH值能调节至11, COD_{Cr} 去除率为38.6%;隋倩雯^[22]对猪粪沼液进行氨吹脱试验中,进行了投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对有机物和TP去除的研究,得到最佳 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 5.0 g/L ,此条件下COD、TP去除率分别为30.1%和97.4%。

对于不加碱直接进行氨吹脱,SCOD、TP去除率分别为2.5%和1.6%。龚川南^[23]进行奶牛养殖场沼液氨吹脱试验,沼液不加碱进行吹脱,COD、TP去除率分别为3.7%和0.8%。说明直接进行氨氮吹脱对SCOD、TP影响很小,而氨吹脱过程中挥发性有机物,如挥发性脂肪酸(Volatile fatty acids, VFAs)等会随着气流出。

2.2 酒糟沼液处理运行特性

2.2.1 温度对酒糟沼液氨吹脱运行效果的影响

不同温度对沼液氨吹脱效果影响的试验结果如图3a所示,当温度为 52°C 时,沼液氨氮质量浓度由 $(5398 \pm 267)\text{ mg/L}$ 降至 $(45.6 \pm 3.2)\text{ mg/L}$,氨氮去除率达到99.2%;当温度为 37°C 时,沼液氨氮质量浓度由初始的 $(5338 \pm 267)\text{ mg/L}$ 降至 $(122 \pm 6.1)\text{ mg/L}$,氨氮去除率达到97.7%。温度从 37°C 升至 52°C ,氨氮去除率仅增大1.5个百分点,该结

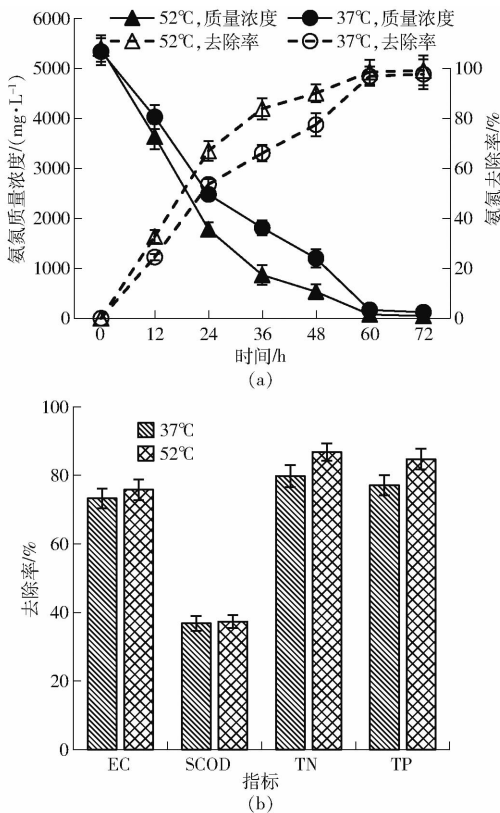


图3 不同温度对氨氮吹脱运行效果的影响

Fig. 3 Effects of different temperatures on operation effect of ammonia nitrogen stripping

果与其他研究者具有可比性,金要勇等^[24]使用氨吹脱柱对奶牛养殖废水进行氨吹脱处理,研究温度对去除氨氮的影响时发现,从 30°C 升至 35°C 氨氮去除率仅提高了1.1个百分点;马凯歌^[25]对煤化工废水进行氨吹脱试验,发现温度从 40°C 提升至 60°C ,氨氮去除率仅提升约4.4个百分点。以上结果同样说明过高的温度对氨氮去除影响不大。除了氨氮的变化,其它指标如EC、SCOD、TN、TP等(图3b),在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量和气流量相同情况下, 37°C 和 52°C 各指标对比相差不大,不存在显著差异($P > 0.05$)。另外经过经济性核算,当温度从 37°C 升至 52°C 所需要的电耗较大,并且该酒糟沼液为中温($(37 \pm 2)^\circ\text{C}$)厌氧发酵罐的副产物,后端采用与中温发酵相近的温度进行吹脱是符合工程实际的。综合考虑选择 37°C 作为适于氨吹脱装置性能的合适温度。

2.2.2 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量对酒糟沼液氨吹脱运行效果的影响

不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加方案对沼液氨吹脱效果影响试验结果如图4a所示,酒糟沼液在不投加碱吹脱48 h时氨氮浓度基本保持稳定,对应的氨氮去除率为78.1%。投加一次碱方案(8 h处 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 9.9 g/L)下,沼液吹脱64 h后氨氮质量浓度降至 $(134 \pm 9.4)\text{ mg/L}$,氨氮去除率达到97.5%;相比于吹脱48 h处投碱方案,达到氨氮去除率最大值所需的吹脱时间缩短了8 h;投加两次碱方案(8 h处 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 9.9 g/L 和30 h处 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 7.4 g/L)下,吹脱40 h后沼液氨氮质量浓度降至 $(135 \pm 8.1)\text{ mg/L}$,氨氮去除率达到97.4%,比在48 h处投碱达到相同氨氮去除率缩短了32 h。由于吹脱过程前期沼液浓度高,故反应速率快,但随着吹脱的进行,沼液的浓度会降低,此时反应速率会减慢,故在吹脱前期和后期单独加碱只是暂时增加反应速率,对于整体的吹脱进程影响不大。而试验中分别在前期和后期各加一次碱,既能使前期沼液浓度高时速率快,又能保证后期沼液浓度降低时速率快,这样会使整体进程明显缩短。经过显著性分析可知,8 h处投碱以及48 h处投碱,达到接近氨氮去除率所需时间不存在显著差异($P > 0.05$),在8 h和30 h处进行2次投碱与其他2种情形相比显著差异($P < 0.05$)。因此,投加2次碱在达到相同氨氮去除效果条件下能显著缩短吹脱时间,这能大大减少试验装置运行过程的电能等消耗。

如图4b所示,相对于不投碱,投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 大幅提高了吹脱过程中TN、EC、SCOD和TP去除率。3种投碱方案情景下TN去除率为79.8%~84.2%,不存在显著差异($P > 0.05$)。3种投碱方案

下 TP 和 SCOD 去除率分别为 77.1% ~ 91% 和 36.8% ~ 45.3%，显著高于不投碱吹脱 48 h 条件下 TP 去除率(2.2%)和 SCOD 去除率(3.4%)。8 h 和 30 h 2 次投碱方案下 EC、SCOD 和 TP 去除率最高。故综合考虑确定 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加方案为 8 h 和 30 h 2 次投放。

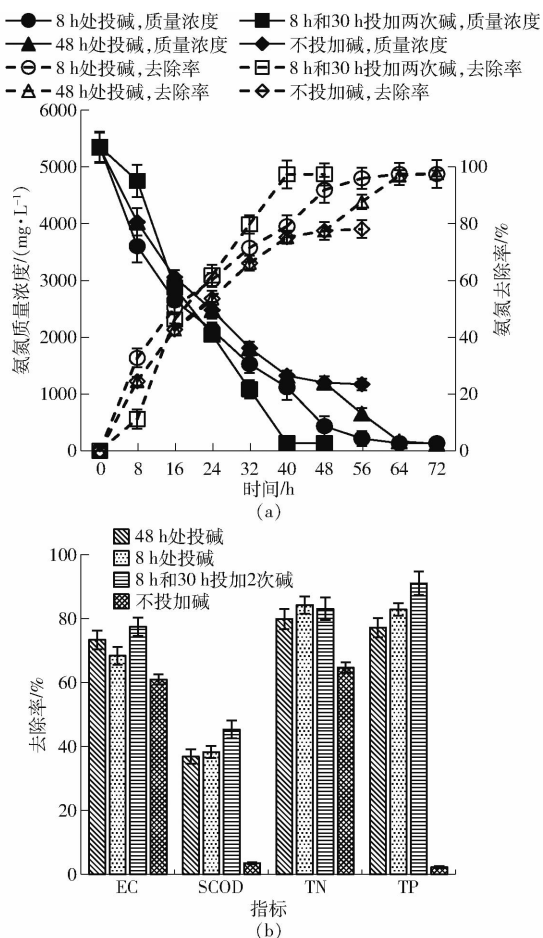


图 4 不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加方案对氨氮吹脱运行效果的影响
Fig. 4 Effects of different $\text{Ca}(\text{OH})_2$ addition on operation effect of ammonia nitrogen stripping

2.2.3 填料种类对酒糟沼液氨吹脱运行效果的影响

试验装置中分别装填多面空心球、鲍尔环和流化床填料,在温度 37°C 、气流量 $24\text{ L}/\text{min}$ 时,分别在 8 h 和 30 h 处投碱,试验结果如图 5a 所示,经过 40 h 吹脱后,3 种填料氨氮浓度大幅下降,氨氮质量浓度分别由 5 355、5 354.8、5 353.1 mg/L 降至 135.0、677.5、194.5 mg/L ,氨氮去除率分别为 97.4%、87.3%、96.4%。对 3 种填料进行方差分析,多面空心球和流化床填料对氨氮的去除效果无显著差异 ($P > 0.05$),且这 2 种填料的氨氮去除率显著高于鲍尔环填料 ($P < 0.05$),主要是由于多面空心球和流化床填料的比表面积和堆积密度均大于鲍尔环填料,这就增大了试验装置中的气液接触面积和填充率,沼液在填料中容易形成液膜,延长了气液接触的

时间,提高传质效率,从而提高氨氮去除效果^[26]。该试验结果与其他氨吹脱研究具有可比性,龚川南^[23]在进行吹脱柱试验时,使用多面球和鲍尔环填料研究填料对氨吹脱的影响,当条件为温度 30°C 、气液比 4 000 和 pH 值 11 时,多面球填料氨氮去除率为 88%,显著高于鲍尔环填料的氨氮去除率 76%;邹梦圆等^[27]对猪场沼液采用空心多面球、流化床和鲍尔环 3 种填料在 pH 值 10.5、气液比 2 000 和温度 30°C 条件下进行氨吹脱试验,吹脱时间为 2 h 后 3 种填料对应的氨氮去除率分别为 80.7%、77.4% 和 59.0%。此外,多面空心球填料的 SCOD 和 TN 略优于另外 2 种填料(图 5b)。故综合考虑确定较适填料为多面空心球填料。

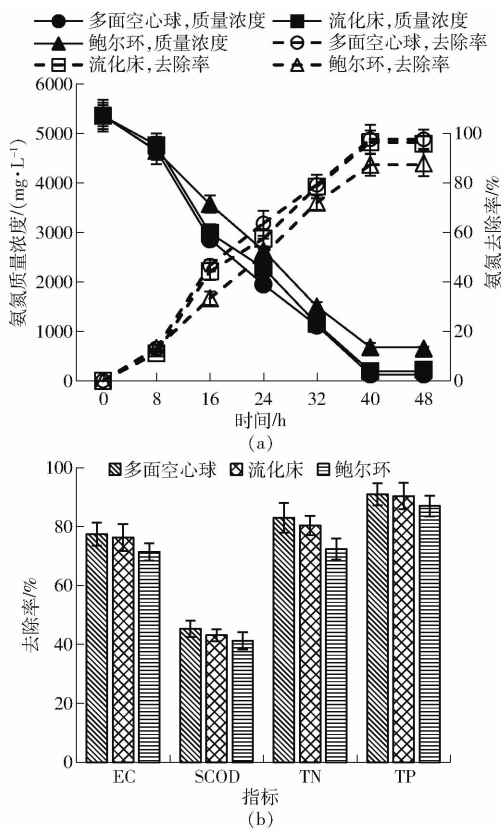


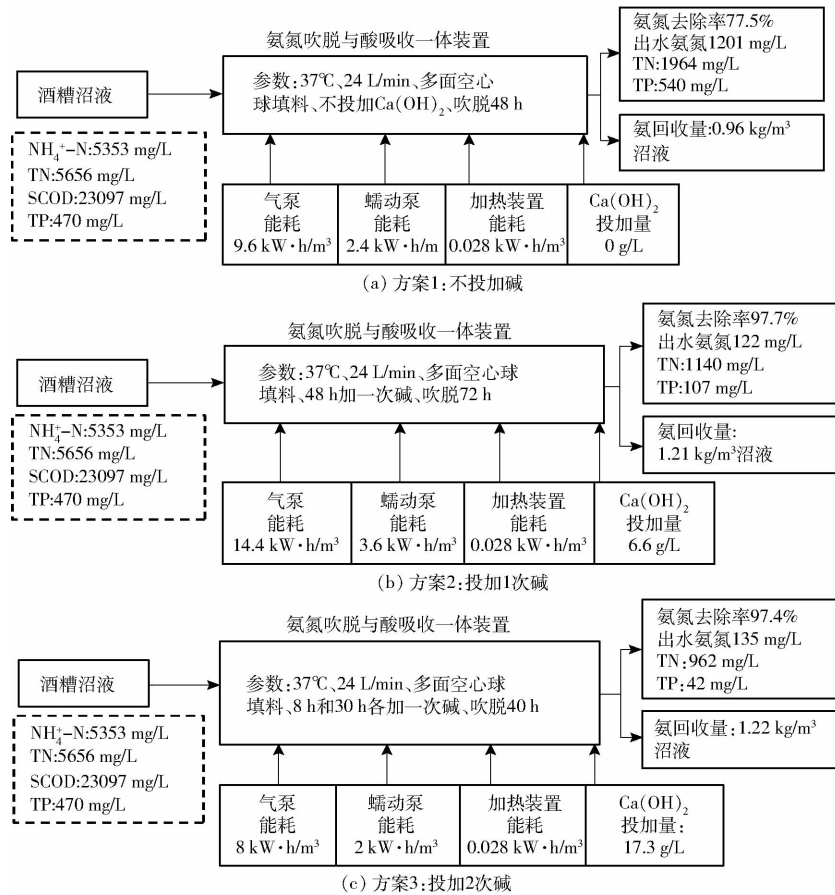
图 5 不同填料种类对氨氮吹脱运行效果的影响
Fig. 5 Effects of different filler types on operation effect of ammonia nitrogen stripping

2.3 酒糟沼液氨吹脱工艺经济性评价

2.3.1 不同投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 方案下氨吹脱经济性比较

氨吹脱与酸吸收一体试验装置处理酒糟沼液试验研究中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加能够缩短吹脱时间并提高氨氮去除率,但同时也增加了投碱量。因此,对 3 种方案沼液吹脱工艺特性进行经济性比较分析,如图 6 所示。

对各方案处理成本按照工业污水处理成本计算方法计算。工业上污水处理的处理成本包括运行成本、财务成本和折旧费等部分^[28],其计算公式为^[29]

图6 不同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加方案下物质与能量流动情况Fig. 6 Matter and energy flow under different scenarios of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ addition

$$C = A + W + P + M + R + Q$$

式中 C ——污水月处理总成本

A ——折旧费 W ——人员费

P ——动力费 M ——维修费

R ——药剂成本

Q ——其他费用,根据前5项费用的5%估算

折旧费、人员费和维修费是工程实际需要考虑的,往往是按照实际情况有较大的变化,因此该部分不做讨论。成本核算主要考虑运行成本,包括:药剂投加成本和动力费,即物耗和能耗两部分。药剂消耗主要是投加碱剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的用量;动力费包括:气泵(功率 0.2 kW)、蠕动泵(功率 50 W)和加热装置(额定功率 1.8 kW)能耗。动力费按 0.85 元/(kW·h)(工业用电)计算。各项按照处理 1 m^3 沼液计算,成本和收益情况如图 7 所示。

由图 7 可知,方案 3(投加 2 次碱)兼具处理成本低和氨回收收益高的特点,投入成本与回收价值相抵后总成本为 9.75 元/ m^3 。

2.3.2 不同氨氮沼液资源化利用途径经济性比较

沼液资源化利用途径主要包括:还田处理(直接还田处理、其他工艺与还田组合处理)、物化处理(未达标处理)、生物处理(未达标处理)、达标排放

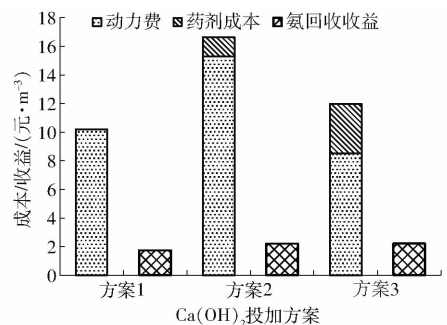


图7 各方案经济性比较

Fig. 7 Economic comparison analysis of different scenarios

(工艺组合达标处理)。

将沼液氨吹脱与其它资源化利用途径进行对比分析(表 6),沼液直接还田的成本主要包括人工费和运输费,是目前资源化利用最为广泛且较为经济的方式之一,但随着运输半径的增加,成本也随之增加;另外,各种处理方式的成本差异较大。其中生物处理成本较低,主要是生物法不需要外加化学药剂,但对于低碳氮比的氨氮废水处理需要加入一定的碳源而增加处理成本;达标排放处理成本高是由于需要几种工艺组合处理,且随着药剂的投入而增加成本;氨吹脱工艺简单、去除效果好并且有较好的氨氮回收效益,相较于化学沉淀法和膜处理成本低。

表 6 不同氨氮沼液资源化利用途径经济性比较

Tab. 6 Economic comparison of different resource utilization approaches for ammonia nitrogen biogas slurry

处理方式	具体工艺	处理沼液	初始氨氮浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总成本/ ($\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$)	是否全 工艺	文献序号
还田处理	直接还田	酒糟沼液	5 300	30 ~ 75	是	贵州某酒糟沼气工程
	氨吹脱 + 还田处理	酒糟沼液	5 353	29.75	是	本文
物化处理	氨氮吹脱	猪场沼液	1 840.3	10.3	否	[30]
		牛场沼液	500	5.62	否	[23]
		酒糟沼液	5 353	9.75	否	本文
		猪场沼液	450	34.8	否	[31]
		养猪沼液	1 310	42.2	否	[32]
生物处理	膜生物反应器	猪场沼液	927	12.04	否	[33]
	序批式活性污泥法	牛场沼液	38	0.5	否	[34]
	膜生物反应器 + 纳滤	餐厨沼液	1 960	54.2	是	[35]
达标排放	氨吹脱 + 膜生物反应器 + 反渗透	垃圾渗滤液	3 200	56.6	是	[36]

酒糟沼液通过氨氮吹脱处理,总成本为 $9.75 \text{ 元}/\text{m}^3$,经济性较好,处理后剩余氨氮浓度较低,但未能达到排放标准,可选择对其进行后续净化处理出水达标排放。隋倩雯^[22]采用氨吹脱和膜生物反应器组合处理猪场沼液,得到组合工艺的处理成本为 $7.76 \text{ 元}/\text{m}^3$,说明氨吹脱和生物法组合处理方式有较好的经济性。另外,经氨吹脱后的沼液总氮质量浓度为 $962 \text{ mg}/\text{L}$,总磷质量浓度 $42 \text{ mg}/\text{L}$,且含有一定的腐殖质等物质,仍可作为液态有机肥灌溉于农田。因此,为缓解当前沼液还田压力,可采用氨吹脱 + 还田或氨吹脱 + 生物法辅助处理沼液。

3 结论

(1)对酒糟沼液氨吹脱影响因素 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量、温度和气流量进行正交试验优化,影响因素重要性由强到弱依次为: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量、气流量、温度,在较优工艺参数为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 $6.6 \text{ g}/\text{L}$ 、气

流量 $6 \text{ L}/\text{min}$ 和温度 52°C 条件下氨氮去除率为 99.0% ;另外,投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节 pH 值能够对沼液中的有机物等起到了混凝沉淀作用,进而促进 SCOD 和 TP 的去除, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量 $6.6 \text{ g}/\text{L}$ 对 SCOD 和 TP 去除率分别为 32.5% 和 65.7% 。

(2)采用氨吹脱酸吸收一体试验装置处理酒糟沼液,采用多面空心球填料、温度 37°C 、2 次投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (吹脱 8 h 投加 $9.9 \text{ g}/\text{L}$ 、30 h 投加 $7.4 \text{ g}/\text{L}$)条件下氨吹脱试验装置运行效果最好,氨氮去除率达到 97.4% 。投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 大幅提高了吹脱过程中 TN、EC、SCOD 和 TP 去除率。

(3)对酒糟沼液氨吹脱工艺进行经济性评价,两次投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 情景下氨氮去除率超过 97% ,出水氨氮质量浓度低($100 \text{ mg}/\text{L}$ 左右),运行处理成本为 $9.75 \text{ 元}/\text{m}^3$,具有较好的经济性;经氨氮吹脱回收养分后的沼液,可进行还田利用或者进一步深度处理出水达标排放。

参 考 文 献

- [1] 胡志强,李存福,张国顺,等.白酒酒糟综合利用技术研究进展[J].山东化工,2019,48(15):76-78.
HU Zhiqiang, LI Cunfu, ZHANG Guoshun, et al. Research progress of comprehensive utilization technique of distiller's grains [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(15): 76-78. (in Chinese)
- [2] 蔡凤娇,蔡林洋,孔博,等.白酒糟的多元化利用研究进展[J].酿酒,2020,47(2):11-15.
CAI Fengjiao, CAI Linyang, KONG Bo, et al. Research progress on diversified utilization of distiller's grains [J]. Liquor Making, 2020, 47(2): 11-15. (in Chinese)
- [3] 谢彤彤.酒糟厌氧消化液中丙酸互营降解微生物研究[D].青岛:青岛大学 2020.
XIE Tongtong. Research of syntrophic propionate-degrading consortia from anaerobic digestion of vinasse [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020. (in Chinese)
- [4] 严潇南.养殖场厌氧发酵沼液有效消纳途径探析[J].工业用水与废水,2015,46(6):9-12.
YAN Xiaonan. Explore and analysis of effective way of farm anaerobic fermentation biogas slurry disposition [J]. Industrial Water & Wastewater, 2015, 46(6): 9-12. (in Chinese)
- [5] LI G, HU R C, WANG N, et al. Cultivation of microalgae in adjusted wastewater to enhance biofuel production and reduce environmental impact: pyrolysis performances and life cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 355: 131768.
- [6] LI G, ZHANG J, LI H, et al. Towards high-quality biodiesel production from microalgae using original and anaerobically-digested livestock wastewater [J]. Chemosphere, 2021, 273: 128578.
- [7] 吴海忠.吹脱法处理高氨氮废水关键因素研究进展[J].绿色科技,2013(2):144-146.

- WU Haizhong. Research progress on key factors in the treatment of high ammonia nitrogen wastewater by stripping[J]. Journal of Green Science and Technology, 2013(2): 144 - 146. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] 吴丹, 刘伟, 张琦, 等. 高浓度氨氮废水处理方法研究进展[J]. 盐科学与化工, 2020, 49(4): 10 - 15, 19.
WU Dan, LIU Wei, ZHANG Qi, et al. Research progress on high concentration ammonia nitrogen wastewater treatment methods [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2020, 49(4): 10 - 15, 19. (in Chinese)
- [10] 刘良. 厌氧消化液氨氮吹脱和钙剂絮凝工艺研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
LIU Liang. Research on ammonia stripping and calcium flocculation process of anaerobic digestate [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [11] PALAKODETI A. A critical review of ammonia recovery from anaerobic digestate of organic wastes via stripping [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021: 143. 110903.
- [12] 吴树彪, 徐新洁, 孙昊, 等. 厌氧消化液氨氮吹脱回收整体处理装置设计与中试试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 208 - 215.
WU Shubiao, XU Xinjie, SUN Hao, et al. Design and test of integrated device for ammonia nitrogen stripping and recovery of anaerobic digested effluent[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 208 - 215. (in Chinese)
- [13] 隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 等. 提高猪场沼液净化处理效果的氨吹脱控制参数[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 205 - 211.
SUI Qianwen, DONG Hongmin, ZHU Zhiping, et al. Ammonia stripping control parameters for improving effluent treatment effect in anaerobic digesters of piggery wastewater[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 205 - 211. (in Chinese)
- [14] 龚川南, 陈玉成, 黄磊. 曝气吹脱法用于牛场沼液污染物的去除[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 6 - 11.
GONG Chuannan, CHEN Yucheng, HUANG Lei. Pollutants removal characteristics by air stripping with aeration treating biogas slurry of cattle manure[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 6 - 11. (in Chinese)
- [15] LU J, KITAMURA Y, TAKISAWA K, et al. Development of a partial heating system to enhance bio-ammonia production and recovery by anaerobic digestion of nitrogen-rich wastewater: effect of partial heating modules [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 262: 973 - 979.
- [16] HASAR H, UNSAL S A, IPEK U, et al. Stripping/flocculation/membrane bioreactor/reverse osmosis treatment of municipal landfill leachate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1 - 3): 309 - 317.
- [17] 金明军. 猪场废水厌氧消化液氨氮吹脱工艺优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
JIN Mingjun. Optimization of ammonium stripping from anaerobic digestion effluent of swine wastewater [D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [18] GUSTIN S, ROMANA M. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(1): 61 - 66.
- [19] 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 - 3): 326 - 332.
- [20] HUSSAIN S, AZIZ H A, ISA M H, et al. Orthophosphate removal from domestic wastewater using limestone and granular activated carbon[J]. Desalination, 2011, 271(1 - 3): 265 - 272.
- [21] 金要勇. 氨吹脱-混凝处理奶牛养殖废水厌氧出水的试验研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2015.
JIN Yaoyong. Experimental study on the treatment of anaerobic effluent of dairy wastewater by ammonia stripping and coagulation [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [22] 隋倩雯. 氨吹脱与膜生物反应器组合工艺处理猪场厌氧消化液研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
SUI Qianwen. Combined of ammonia stripping and membrane bioreactor processes for anaerobically digested swine wastewater treatment [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [23] 龚川南. 氨吹脱对奶牛养殖场沼液脱氮与氮回收研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
GONG Chuannan. Removal and recovery of nitrogen from dairy farm biogas slurry by ammonia stripping [D]. Chongqing: Southwest University, 2016. (in Chinese)
- [24] 金要勇, 孟海玲, 刘再亮, 等. 奶牛养殖废水厌氧出水的吹脱混凝处理试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 384 - 390.
JIN Yaoyong, MENG Hailing, LIU Zailiang, et al. Treatment of anaerobic effluent of dairy wastewater by ammonia stripping-coagulation combination [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(2): 384 - 390. (in Chinese)
- [25] 马凯歌. “吹脱+吸附”工艺对煤化工废水中氨氮的除脱效果试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
MA Kaige. Experimental study on the effect of “blowing off + adsorption” process on ammonia nitrogen removal from coal chemical wastewater [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese)
- [26] 邹梦圆. 猪场沼液膜浓缩氨吹脱工艺研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
ZOU Mengyuan. Study on ammonia stripping process of biogas slurry with membrane concentration treatment [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. (in Chinese)
- [27] 邹梦圆, 董红敏, 朱志平, 等. 惰性填料种类对猪场沼液氨吹脱效果的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 186 - 192.
ZOU Mengyuan, DONG Hongmin, ZHU Zhiping, et al. Effect of different types of sluggishness packings on ammonia stripping

- of piggery biogas slurry[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(23): 186 - 192. (in Chinese)
- [28] 霍艳玲. 污水处理厂运行成本分析与管理[J]. 环渤海经济瞭望, 2020(10): 159 - 160.
- [29] 原培胜. 污水处理厂处理成本分析[J]. 环境工程, 2008(2): 55 - 57, 54.
- [30] 张秀之. 养殖废水氨吹脱工艺及脱氮沼液处理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
ZHANG Xiuzhi. Ammonia stripping process of aquaculture wastewater and treatment of denitrification biogas slurry [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [31] 黄彬, 郭惠娟, 毛林强, 等. 磷酸铵镁(MAP)结晶法回收粪污/秸秆混合发酵沼液中氮磷的特性研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(3): 72 - 77.
HUANG Bin, GUO Huijuan, MAO Linqiang, et al. Recovery of nitrogen and phosphorus from biogas slurry of pig manure-straw mixed fermentation[J]. China Biogas, 2018, 36(3): 72 - 77. (in Chinese)
- [32] 方丽娜. 沼液多级膜法处理工艺研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.
FANG Li'na. Study on treatment technology of biogas slurry by multi-stage membrane process [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018. (in Chinese)
- [33] 税勇. 膜生物反应器与间歇曝气序批式膜生物反应器处理养猪沼液的试验研究[D]. 常州: 常州大学, 2015.
SHUI Yong. A study on membrane bioreactor and intermittent aeration sequencing membrane bioreactor to treat digested piggery wastewater[D]. Changzhou: Changzhou University, 2015. (in Chinese)
- [34] 戴优优. 组合工艺处理奶牛场沼液的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
DAI Youyou. Study on the treatment of dairy farm biogas slurry by combined process[D]. Shanghai: Fudan University, 2014. (in Chinese)
- [35] 李义烁, 梁远, 颜莹莹, 等. 餐厨垃圾/市政污泥/城市粪便联合厌氧消化沼液处理设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 56 - 62.
LI Yishuo, LIANG Yuan, YAN Yingying, et al. Design of treatment process of biogas slurry from anaerobic co-digestion of kitchen waste/municipal sludge /urban excrement[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 56 - 62. (in Chinese)
- [36] 柴健. 氨吹脱+外置式 MBR+DTRO 工艺处理垃圾渗滤液工程应用[J]. 水处理技术, 2019, 45(9): 137 - 140.
CHAI Jian. Application of ammonia stripping + external MBR + DTRO process in landfill leachate treatment project [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(9): 137 - 140. (in Chinese)

(上接第 233 页)

- [19] ZHANG Y, ZHU D, BI H, et al. Scattering key-frame extraction for comprehensive VideoSAR summarization: a spatiotemporal background subtraction perspective [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(7): 4768 - 4784.
- [20] LIN G, TANG Y, ZOU X, et al. Fruit detection in natural environment using partial shape matching and probabilistic Hough transform [J]. Precision Agriculture, 2020, 21(1): 160 - 177.
- [21] 王可, 郭浩, 马钦, 等. 基于单视角点云镜像的猪只体尺测量方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 187 - 195.
WANG Ke, GUO Hao, MA Qin, et al. Pig body size measurement method based on mirror reflection of single angle point cloud [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 187 - 195. (in Chinese)
- [22] 秦立峰, 张晓茜, 董明星, 等. 基于多特征融合相关滤波的运动奶牛目标提取[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 244 - 252.
QIN Lifeng, ZHANG Xiaoqian, DONG Mingxing, et al. Target extraction of moving cows based on multi-feature fusion correlation filtering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 244 - 252. (in Chinese)
- [23] HONEYCUTT W T, BRIDGE E S. Uncanny: exploiting reversed edge detection as a basis for object tracking in video [J]. Journal of Imaging, 2021, 7(5): 77 - 86.
- [24] CUPEC R, VIDOVIĆ I, FILKO D, et al. Object recognition based on convex hull alignment [J]. Pattern Recognition, 2020, 102: 107199.
- [25] MORI T, MANABE T, SHIBATA Y. A hardware oriented approximate convex hull algorithm and its FPGA implementation [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2022, 105(3): 459 - 467.
- [26] 赵凯旋, 刘晓航, 姬江涛. 基于 EfficientNet 与点云凸包特征的奶牛体况自动评分[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 192 - 201.
ZHAO Kaixuan, LIU Xiaohang, JI Jiangtao. Automatic body condition scoring method for dairy cows based on EfficientNet and convex hull feature of point cloud [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 192 - 201. (in Chinese)
- [27] SHI H, SUN X, WANG S, et al. Total least squares estimation model based on uncertainty theory [J/OL]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2022: 1 - 7. DOI:10.1007/s12652-021-03671-2.
- [28] 初梦苑. 基于三维重建的奶牛体尺检测与体重预估研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
CHU Mengyuan. Research on body measurement and weight estimation of cows based on 3D reconstruction [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)