

连续闭式循环氨脱除工艺响应面法优化

庞昌乐¹ 柏林杰¹ 刘良²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 南开大学天津市生物质类固废资源化技术工程中心, 天津 300350)

摘要: 针对两阶段闭式循环氨脱除工艺处理猪粪厌氧消化液耗时、耗碱、难以达到工业化大量污水处理的需求问题,进行了连续闭式循环氨脱除工艺的试验研究。试验结果表明,对于起始氨氮质量浓度为(1 444 ± 37) mg/L 的猪粪厌氧消化液,在气流量为 530 L/h、液流量为 445 mL/h、气液比为 2 036 条件下,氨氮脱除率可达(66.81 ± 0.24)%。经 RSM 优化的模型能够很好地分析和预测该工艺及系统条件下猪粪厌氧消化液的氨氮去除结果。所选自变量对于氨氮脱除的影响力从大到小依次为:气液比、液流量、气流量。研究结果可为猪粪厌氧消化液的连续处理提供依据。

关键词: 猪粪; 厌氧消化液; 氨脱除工艺; 连续闭式循环; 响应面法

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0288-06

Optimization of Continuous Air-recirculation Process for Ammonia Removal by Response Surface Methodology

PANG Changle¹ BAI Linjie¹ LIU Liang²

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

2. Tianjin Municipal Biomass Solid Waste Resources Technology and Engineering Center, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Anaerobic digestate of pig manure has the characteristics of continuous and quantitative poly. The effluent of anaerobic digestate contains a large amount of ammonia nitrogen. The processing capacity of the two stage air-recirculation stripping process is difficult to meet industrial requirements for treatment of anaerobic digestate of pig manure. Gas flow rate, liquid flow rate and gas – liquid ratio were chosen as running parameters of continuous air-recirculation process. The running parameters were studied and the process was optimized by response surface methodology. The initial ammonia nitrogen concentration of anaerobic digestate was (1 444 ± 37) mg/L. Ammonia nitrogen removal rate could reach (66.81 ± 0.24)% when the gas flow rate, liquid flow rate and gas – liquid ratio were 530 L/h, 445 mL/h and 2 036, respectively, which was the best optimal parameters combination. The model optimized by response surface methodology could well analyze and predict ammonia nitrogen removal efficiency of continuous air-recirculation process for treating anaerobic digestate of pig manure. Gas – liquid ratio was the limiting factor for the process of continuous air-recirculation stripping process. According to perturbation plots of ammonia removal efficiency, the influence order from large to small of the three selected parameters for removal ability of ammonia nitrogen was gas – liquid ratio, liquid flow rate and gas flow rate. The process could be used to strip and recover ammonia nitrogen from anaerobic digestate of pig manure. It could reduce foaming tendency of treated fluid and the foams could be broken more quickly than the two stage air-recirculation stripping process. The process could reduce the height of stripping tower and investment of engineering. The result can provide some references for the continuous processing for anaerobic digestate of pig manure.

Key words: pig manure; anaerobic digestate; ammonia removal process; continuous air-recirculation stripping; response surface methodology

收稿日期: 2016-06-08 修回日期: 2016-09-26

基金项目: 现代农业产业技术体系项目(CARS-36)和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA101803)

作者简介: 庞昌乐(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事生物质转化和农业工程装备研究,E-mail: pangcl@cau.edu.cn

通信作者: 刘良(1981—),男,博士后,主要从事农业资源与环境 and 设施农业设计研究,E-mail: liuliang198104@163.com

引言

氨氮是重要的环境污染物,能够引起水体富营养化、土壤酸化、气溶胶的形成^[1]、光化学污染^[2]等。氨氮进入血液能够与血红蛋白结合,导致动物机体抵抗力下降,进入呼吸系统会引起咳嗽、气管炎等^[3]。全球人为排放的氨氮约 94% 来自农业生产,而这其中的 68% 来源于畜禽养殖^[4]。生猪产业是我国农业的支柱产业,而规模化的养殖方式又导致猪场的粪污形成聚量化的趋势,沼气工程在处理养殖粪污方面表现出了较好的作用,但是沼气工程设计之初并未考虑氨氮的处理。猪粪厌氧消化液含有大量氨氮^[5-7],主要由猪排泄物中的尿酸、尿素、胺和未消化蛋白质等含氮物质的厌氧分解而来^[8]。

诸多脱氮工艺已被应用于猪场废水的处置和达标排放。如直接对可生化性差的厌氧消化液进行好氧后处理,但氨氮去除效果并不理想,往往需外加碱或碳源等方法加以改善^[9-13],这又会增加装置投资及运行费用等。其它工艺也存在耗时长、工艺复杂、运行成本高等问题。吹脱法以其氨氮脱除率高、处理成本较低、设备简单等优点,在不同领域被加以研究^[5-7,14-17]。实验室规模的、采用连续式吹脱法处理畜禽粪污厌氧消化液的研究较少,GUŠTIN 等^[18]在研究 pH 值、温度和气流量对连续式氨吹脱效率的作用时,认为吹脱法可成功地应用于猪粪厌氧消化液的氨氮脱除工作。如果要将吹脱工艺进行规模推广,序批式处理工艺较难满足大量废水处理的需求。连续式吹脱工艺则具有较高氨氮脱除效率、设备体积较小、占地面积相对较少的特点。工业化的氨吹脱塔主要采用连续工艺,且主要采用气液逆流操作的填料塔,相比之下气泡塔的研究鲜见报道。

本文在两阶段闭式循环工艺研究的基础上^[19],采用连续工艺对猪粪厌氧发酵液氨氮的去除效果进行研究,旨在为厌氧消化液的回流和氮素回收提供支持,并将该工序植入厌氧消化液的减排和达标排放系统。本文重点研究气流量、液流量、气液比 3 个控制参数对氨氮去除效果的影响,利用响应面法(RSM)优化氨氮脱除率与控制参数的二次回归方程,获得最佳参数组合,以期为连续闭式循环脱氮工艺提供一定的技术参考及理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验装置及试验步骤

1.1.1 试验装置

试验在有机玻璃鼓泡反应器(外径 $\Phi=0.15\text{ m}$, 高度 $h=0.40\text{ m}$)中进行。气泵为系统提供所需动

力;气泵进气前端设置有气液缓冲装置、后端设置回收 NH_3 的酸吸收装置($0.5\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$);酸吸收装置出气端与 LZB-6 型玻璃转子气体流量计连接;气体经布气装置进入反应器,系统与外界无气体交换作用;液体由 KCP-S 微型蠕动泵注入或排出,各部件如图 1 所示。

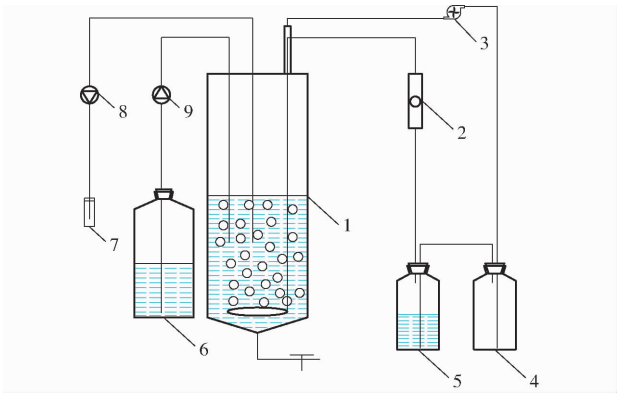


图 1 闭式循环系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air-recirculation stripping system

1. 鼓泡反应器 2. 玻璃转子流量计 3. 气泵 4. 气流缓冲装置
5. 酸吸收装置 6. 储液瓶 7. 离心管 8. 出液微型蠕动泵
9. 进液微型蠕动泵

1.1.2 试验步骤

(1) 向 200 mL 去离子水投加 37 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (以 CaO 计),利用电磁搅拌器处理 10 min,将悬浊液缓慢倒入 4 L 吹脱法脱除 CO_2 且 pH 值为 9.00 的预处理厌氧上清液中,搅拌絮凝将其 pH 值调至 12.00 ± 0.10 ,并沉降 12 h,使用一批预处理一批。

(2) 取处理后的 pH 值为 12.00 适量上清液充分混合并加热至 36°C 后置入温控柜,温控柜温度调至 36°C ,开启气泵和进液蠕动泵,在达到规定气液比时开启出液蠕动泵,排出 10 mL 后取吹脱样品 5 mL 用于各项指标测定。

1.2 试验材料及分析方法

试验用猪粪厌氧消化液取自北京市顺义区一USR(升流式固体厌氧反应器)工艺的沼气工程,pH 值为 7.61 ± 0.05 ,化学需氧量和氨氮质量浓度分别为 $(3\,087 \pm 57)\text{ mg/L}$ 和 $(1\,444 \pm 37)\text{ mg/L}$ 。

1.3 试验设计

选取气流量、液流量和气液比作为自变量,分别记为 x_1 、 x_2 和 x_3 ,利用 Box-Behnken 设计(BBD)方法设计三因素三水平中心点重复 3 次共计 15 组试验,因素和编码如表 1 所示。

利用 RSM 进行多项式拟合,得到二次多项式模型为

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \tag{1}$$

式中 y ——氨氮脱除率, %

表 1 Box – Behnken 设计试验变量和编码

Tab.1 Variables and coding standards of Box – Behnken design

编码	因素		
	气流量 $x_1/(L\cdot h^{-1})$	液流量 $x_2/(mL\cdot h^{-1})$	气液比 x_3
-1	360	400	1 750
0	480	500	2 000
1	600	600	2 250

2 试验结果

2.1 氨氮脱除率及预测模型的建立

试验按照编码顺序进行,15 组的试验设计及试验结果如表 2 所示。

表 2 试验设计与结果

Tab.2 Experimental design and results

试验 序号	X_1	X_2	X_3	$y/\%$	
				实际值	预测值
1	0	1	1	43.94	43.82
2	0	0	0	65.85	66.20
3	-1	-1	0	57.47	57.57
4	1	1	0	52.98	52.88
5	0	-1	1	62.10	61.63
6	0	1	-1	40.53	41.00
7	1	0	1	59.97	59.99
8	-1	0	-1	44.26	44.05
9	1	-1	0	65.51	65.77
10	0	-1	-1	56.29	56.41
11	-1	1	0	37.50	37.24
12	0	0	0	66.57	66.20
13	1	0	-1	55.72	55.34
14	0	0	0	66.19	66.20
15	-1	0	1	47.06	47.44

方差分析可用来判断模型各项的显著性和不显著性。本文利用线性回归方差分析对数据进行分析的结果如表 3 所示,拟合得到的二次多项式中, X_1X_3 的 p 值远大于 0.1、 X_2X_3 的 $p=0.062\ 8$,表明其对氨氮脱除率的影响不显著,但是如将 b_{13} 或 b_{23} 调优会导致模型失拟项 F 值增加而 p 值减小,方程拟合效果变差。

模型 $F=608.51$ 且 $p<0.000\ 1$ 表明其适应性显著,自变量对响应值 y 影响显著。模型失拟项 ($F=2.59>0.05$) 对于纯误差作用不显著,说明模型残差由随机误差引起,各因素与响应值之间非线性方程关系显著。复相关系数为 0.999 1,表明预测值与实测值之间高度相关;多元决定系数 $R^2=0.997\ 4$,说明此模型可解释 99.74% 的试验数据变异性,且误差较小;校正复相关系数为 0.997 4,预测复相关系数为 0.988 0,变异系数为 0.92,表明模型

可信度和精确度高。

表 3 回归方程方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	均方	F	p
模型	1 387.16	154.13	608.51	<0.000 1
X_1	284.29	284.29	1 122.40	<0.000 1
X_2	551.45	551.45	2 177.17	<0.000 1
X_3	32.28	32.28	127.45	<0.000 1
X_1X_2	13.84	13.84	54.63	0.000 7
X_1X_3	0.39	0.39	1.54	0.269 4
X_2X_3	1.44	1.44	5.69	0.062 8
X_1^2	129.64	129.64	511.82	<0.000 1
X_2^2	176.45	176.45	696.64	<0.000 1
X_3^2	271.52	271.52	1 072.00	<0.000 1
残差	1.27	0.25		
失拟项	1.01	0.34	2.59	0.291 0
纯误差	0.26	0.13		

上述回归方程方差分析的结果表明模型能够很好地反映出连续闭式循环条件下响应值的变化情况,可分析和预测该工艺条件下猪粪厌氧消化液中氨氮脱除率。各个系数值在上述分析中得以确定,得到预测氨氮脱除率的二次多项式

$$y=66.20+5.96X_1-8.30X_2+2.01X_3+1.86X_1X_2+0.31X_1X_3-0.60X_2X_3-5.93X_1^2-6.91X_2^2-8.58X_3^2$$

(2)

2.2 模型验证

在 Criteria 中,将 y 值的上限设置为 100,在参数取值范围内 Design-Expert 给出了唯一参数组合 ($x_1=530\ L/h$ 、 $x_2=445\ mL/h$ 、 $x_3=2\ 036$) 用于模型可靠性的验证。最优参数组合条件下,厌氧消化液的氨氮脱除率达 $(66.81\pm0.24)\%$,验证结果均在其 95% 预测区间内,相比于最优预测值 69.89%,预测精度高达 95.44%、95.35% 和 95.99%,验证结果进一步表明该模型能较好地预测连续闭式循环氨氮去除工艺应用下猪粪厌氧消化液氨氮去除情况。

3 讨论

3.1 模型残差与因子交互效应

图 2 显示了氨氮脱除率的预测值与实际值之间的关系, $R^2=0.999$ 表明试验值与模型预测值之间的拟合程度高,模型鲁棒性较佳。

图 3 是固定其中一个自变量(气流量 530 L/h、液流量 445 mL/h、气液比 2 036)的条件下,自变量交互作用的响应面图。由图 3a、3b 可见,在试验取值范围内,随着气流量的增加,氨氮脱除率呈现先升高后降低的趋势,这与批式试验的结果一致,主要是因为如果气流量过大,会导致水流紊乱程度加大,

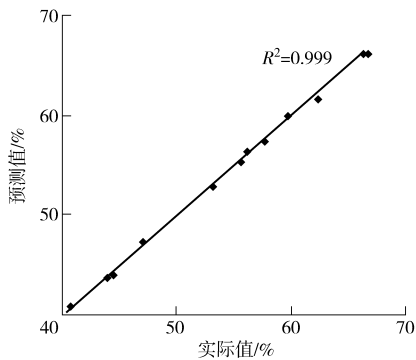


图 2 预测值与实际值关系

Fig. 2 Relationship curve of predicted and actual values

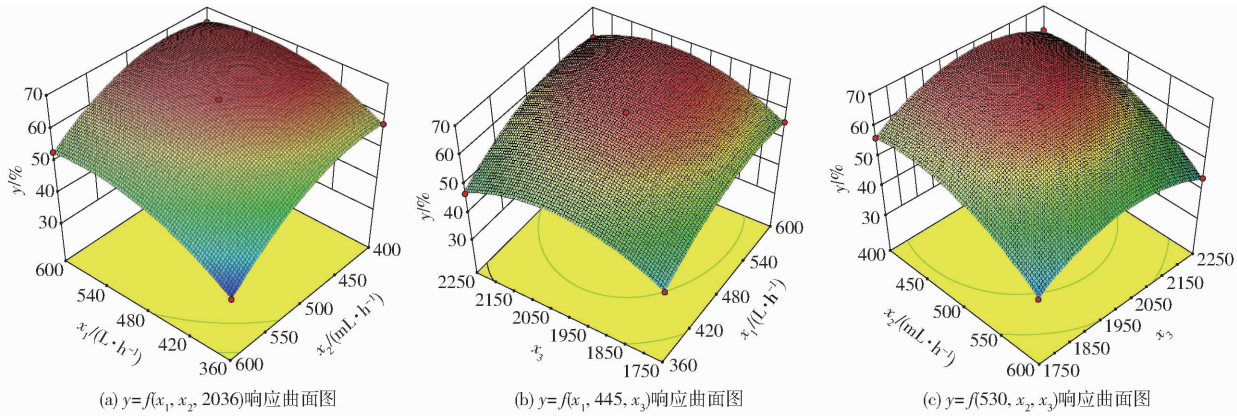


图 3 因素交互作用响应曲面图

Fig. 3 Response surface plots of factor interaction

液比降低,不利于氨氮传质,导致脱除率下降。同样在液流量的曲面图上也有极值点,液流量过低也会对氨氮的传质产生一定的影响,这是因为当气流量一定时,液流量降低,则吹脱装置内部的流体紊乱程度会随之加剧,气泡则被水流胁迫多次进入液流中,无法破碎的气泡中的氨分压差变小,氨氮的气液传质效果变差。

图 3b、3c 因素交互作用表明大的气液比并不能有效地提高氨氮脱除率,这一结果与 GUŠTIN 等^[18]研究结果一致,其研究结果也表明氨氮吹脱工艺的气液比适宜控制在 1 500 ~ 2 000 之间^[18]。气液比过大将导致吹脱时间加长,水分蒸发相比较多,且沾附器壁上吸附氨氮的液滴在试验过程中能够回流到液体中,对氨氮脱除效率起到一定的影响。另外,过长的吹脱时间也会导致工艺的经济性变差。

3.2 因素影响力分析

气液比是连续闭式循环氨氮脱除工艺的限制性因素。噪波图能够反映出各自变量对氨氮脱除的影响力,从图 4 可以看出,在最优组合条件下,因素影响力的顺序从大到小依次是气液比、液流量、气流量。

3.3 与两阶段闭式循环工艺的比较

两阶段闭式循环工艺的最优条件下(气流量 6 L/min、22.13 g CaO 和气液比 3 000)^[18],在气液比

气泡不能及时逸出破裂,影响氨氮的气液传质过程。对于相同的锐孔孔径,随着气流量的增大,气泡的体积随之变大,可见气泡膨胀阶段的体积只与气体体积流量和时间有关^[20],所以气流量变大,相同气液比条件下,则气体通过锐孔的时间变短,单个气泡体积变大,气泡的数量减少,气液接触的传质面积变小,传质效果变差,导致氨氮脱除率降低。

如图 3a、3c 所示,随着液体流量提高,氨氮脱除率有所降低,这主要是因为随着液流量提高,单位时间内进入吹脱装置的液体体积增大,单位时间内气

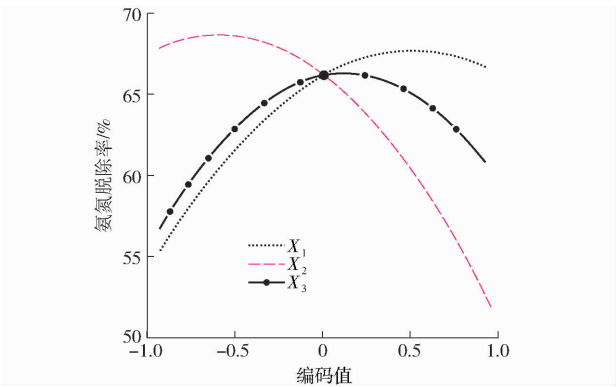


图 4 氨氮脱除率噪波图

Fig. 4 Perturbation plot of ammonia removal efficiency

2 000 时,厌氧消化液氨氮脱除率为 $(87.64 \pm 3.74)\%$ 。连续闭式循环最优工艺条件下(气流量 530 L/h、液流量 445 mL/h、气液比 2 036),氨氮脱除率可达 $(66.81 \pm 0.24)\%$ 。连续闭式循环调节厌氧消化液 pH 值所需 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量(以 CaO 计)为 37 g,即 9.25 g/L 的投加量,相比两阶段 11.07 g/L 的投加量,每升厌氧消化液所消耗的钙剂(以 CaO 计)减少 1.82 g。在处理时间上,连续闭式循环工艺达到 2 036 气液比比两阶段闭式循环工艺达到 2 000 气液比的时间缩短了 7.7 h。两阶段闭式循环工艺将 CaO 直接投加到厌氧消化液中,虽然吹脱结束时,吹脱液 pH 值为 12.55 ± 0.05 ,但这是以 CaO 超量投加

为基础的,相比之下,连续闭式循环工艺将 pH 值调解为 12.00 ± 0.10 ,在吹脱结束时 pH 值依然维持在不低于 11 的状态。

$$c_{\text{NH}_3} = \frac{c_{\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+}}{1 + \frac{c_{\text{H}^+}}{K_a}} = \frac{c_{\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+}}{1 + 10^{n_{\text{pKa}} - n_{\text{pH}}}} \quad (3)$$

$$n_{\text{pKa}} = 4 \times 10^{-8} T^3 + 9 \times 10^{-5} T^2 - 0.0356 T + 10.072 \quad (4)$$

式中 c_{NH_3} ——游离态氨浓度
 $c_{\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+}$ ——游离态氨与 NH_4^+ 浓度
 c_{H^+} —— H^+ 浓度
 n_{pH} ——pH 值 T ——温度
 n_{pKa} ——解离常数 pKa 值,是温度函数

由式(3)、(4)^[21]计算可知,当 pH 值大于等于 11 时,35℃氨离解率可达 99.9%,对于氨氮吹脱的效果不会产生明显影响。

3.4 泡沫趋势的比较

厌氧消化液含有大量的悬浮物^[22]、有机物及丝状菌^[23-25]等易导致泡沫产生的物质。图 5 为采用两阶段闭式循环工艺的中试系统($\Phi = 600\text{ mm}$, $h = 3\,000\text{ mm}$),在气流量为 $105\text{ m}^3/\text{h}$ 处理 200 L 厌氧消化液时高速气流剪切作用下物理泡沫产生的状况。

对厌氧消化液进行预处理的目的是降低处理液泡沫产生能力,迅速破碎泡沫从而降低吹脱塔塔身高度。处理液的泡沫趋势测定参照文献[24]所用方法,即泡沫体积与气流量的比值,单位为 min。

吹脱结束并静置 10 min,取 300 mL 置于 1 L 的



图 5 中试系统产生的细小泡沫
Fig. 5 Tiny bubbles produced in pilot system

量筒内,采用 60 L/h 的气流量曝气处理 5 min,厌氧消化液、两阶段闭式循环工艺处理液和本研究处理液的泡沫趋势分别为 $(4.15 \pm 0.08)\text{ min}$ 、 $(2.09 \pm 0.16)\text{ min}$ 和 $(0.76 \pm 0.03)\text{ min}$,本研究的处理方法更加利于泡沫的破碎,即有利于降低吹脱设备的高度,减少设备投资。

4 结论

(1)在气流量 530 L/h 、液流量 445 mL/h 、气液比 2 036 的最优工艺及连续闭式循环系统条件下,猪粪厌氧消化液氨氮脱除率可达 $(66.81 \pm 0.24)\%$,能够为厌氧消化液的回流和达标排放奠定基础。

(2)RSM 优化的二次回归方程能够很好地分析和预测该工艺及系统下厌氧发酵液氨氮去除结果,自变量影响力顺序从大到小依次为:气液比、液流量、气流量。

参 考 文 献

1 MARTIN S T, HUNG H M, PARKR J, et al. Effects of the physical state of tropospheric ammonium-sulfate-nitrate particles on global aerosol direct radiative forcing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, 4(1): 183–214.

2 LOVANH N, LOUGHRIN J, COOKK, et al. Effect of windrow management on ammonia and nitrous oxide emissions from swine manure composting[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, 2014, 8(6): 369–373.

3 CAI L S, KOZIEL J A, LO Y C, et al. Characterization of volatile organic compounds and odorants associated with swine barn particulate matter using solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1102(1–2): 60–72.

4 STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T, et al. Livestock’s long shadow: environmental issues and options[M]. Rome: Food & Agriculture Org., 2006: 114.

5 LIAO P, CHEN A, LO K. Removal of nitrogen from swine manure wastewaters by ammonia stripping [J]. Bioresource Technology, 1995, 54(1): 17–20.

6 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 and Biotechnology, 2013, 88(9): 1654–1662.

7 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)

8 MCCUBBIN D R, APELBERG B J, ROE S, et al. Livestock ammonia management and particulate-related health benefits [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(6): 1141–1146.

9 杨虹,李道棠. 集约化养猪场冲栏水的达标处理 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(4): 558–560. YANG Hong, LI Daotang. ABR-ICEAS system for piggery wastewater treatment [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,

- 2000, 34(4): 558–560. (in Chinese)
- 10 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 Liangwei, CAI Changda, CHEN Geming, et al. Study and application of technology for post-treatment of anaerobically digested effluent of piggery wastewater [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 92–94. (in Chinese)
- 11 SIEGRIST H. Nitrogen removal from digester supernatant—comparison of chemical and biological methods [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(1): 399–406.
- 12 BAEZA J, GABRIEL D, LAFUENTE J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A²/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system [J]. Water Research, 2002, 36(8): 2109–2123.
- 13 OBAJA D, MACE S, COSTA J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2003, 87(1): 103–111.
- 14 PI K, LI Z, WAN D, et al. Pretreatment of municipal landfill leachate by a combined process [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(3): 191–196.
- 15 OZYONAR F, KARAGOZOGLU B, KOBAYASHI M. Air stripping of ammonia from coke wastewater [J]. Engineering Science & Technology, 2012, 15(2): 85–91.
- 16 MINOCHA V K, RAOA P. Ammonia removal and recovery from urea fertilizer plant waste [J]. Environmental Technology, 1988, 9(7): 655–664.
- 17 BASAKCILARDAN-KABAKCI S, IPEKOGLU A N, TALINLI I. Recovery of ammonia from human urine by stripping and absorption [J]. Environmental Engineering Science, 2007, 24(5): 615–624.
- 18 GUŠTIN S, MARINŠEK-LOGAR R. 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 刘良, 訾海, 陈新颖, 等. 猪粪厌氧消化液两阶段闭式循环氨脱除工艺优化[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 211–216. <http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view-abstract.aspx?file-no=20150930&flag=1>. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.030.
LIU Liang, ZI Hai, CHEN Xinying, et al. Optimization of ammonia stripping process in two-stage air-recirculation for anaerobic digestion of pig manure [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 211–216. (in Chinese)
- 20 刘红, 解茂昭, 韩景东, 等. 黏性液体中锐孔处气泡的形成[J]. 热科学与技术, 2005, 4(3): 262–266.
LIU Hong, XIE Maozhao, HAN Jingdong, et al. Bubble formation from submerged orifice in viscous liquid [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(3): 262–266. (in Chinese)
- 21 BONMATI 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.
- 22 SALMINEN E, RINTALA J, HÄRKÖNENJ, et al. Anaerobically digested poultry slaughterhouse wastes as fertiliser in agriculture [J]. Bioresource Technology, 2001, 78(1): 81–88.
- 23 GANIDI N, TYRREL S, CARTMELL E. The effect of organic loading rate on foam initiation during mesophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(12): 6637–6643.
- 24 SUHARTINI S, HEAVEN S, BANKS C J. Comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of sugar beet pulp: performance, dewaterability and foam control [J]. Bioresource Technology, 2014, 152: 202–211.
- 25 DALMAU J, COMAS J, RODRÍGUEZ-RODAI, et al. Validation of a knowledge-based risk model for biological foaming in anaerobic digestion simulation [C]//Proceedings of the AIAI Workshops, 2009: 322–332.

(上接第347页)

- 17 宋崇林, 段家修, 刘文胜, 等. 柴油机排气微粒中有机可溶成分的分离与定性分析[J]. 内燃机学报, 1997, 15(2): 225–230.
SONG Chonglin, DUAN Jiaxiu, LIU Wensheng, et al. Separation and identification of soluble organic fraction in diesel exhaust particulates [J]. Transactions of CSICE, 1997, 15(2): 225–230. (in Chinese)
- 18 WILLIAMS P T. Diesel particulate emission: role of unburnt fuel in the organic fraction composition [C]. SAE Paper 870554, 1987.
- 19 王桂华, 王钧效, 张锡朝, 等. 柴油机排气微粒中SOF成分的试验研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(2): 110–115.
WANG Guihua, WANG Junxiao, ZHANG Xichao, et al. Experimental study on soluble organic fractions of diesel exhaust particulates [J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(2): 110–115. (in Chinese)
- 20 赵洋, 王忠, 刘帅, 等. 废气再循环气体成分对柴油机颗粒结构特征的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 280–285. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150740&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.040.
ZHAO Yang, WANG Zhong, LIU Shuai, et al. Effect of gas composition in exhaust gas recirculation on structural feature of particulates from diesel engine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 280–285. (in Chinese)