

研究论文

## 沼渣制备生物炭吸附沼液中氨氮

郑杨清<sup>1</sup>, 郁强强<sup>1</sup>, 王海涛<sup>1</sup>, 王远鹏<sup>1</sup>, 何宁<sup>1</sup>, 沈亮<sup>1</sup>, 李清彪<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>厦门大学化学化工学院化学工程与生物工程系, 福建 厦门 361005; <sup>2</sup>泉州师范学院化学与生命科学学院, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 以生物产甲烷的副产物沼渣为原料, 用 5 种不同的方法通过化学活化法制备生物炭, 实验结果表明 5 种生物炭对沼液中的氨氮都有吸附效果, 而氢氧化钾活化制备的生物炭 (KOH-CC) 对氨氮的吸附效果相对较好, 吸附剂对氨氮的吸附符合准二级吸附动力学, 吸附等温线表现为 Langmuir 型, 通过拟合计算最大吸附容量能达到  $120 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。对生物炭进行 BET、扫描电镜及红外等表征, 分析了 KOH-CC 生物炭吸附氨氮过程的作用机理。

**关键词:** 甲烷; 沼渣; 生物炭; 吸附; 氨氮; 吸附剂

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.05.042

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 05—1856—06

## Preparation of biochars from biogas residue and adsorption of ammonia-nitrogen in biogas slurry

ZHENG Yangqing<sup>1</sup>, YU Qiangqiang<sup>1</sup>, WANG Haitao<sup>1</sup>, WANG Yuanpeng<sup>1</sup>, HE Ning<sup>1</sup>, SHEN Liang<sup>1</sup>, LI Qingbiao<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Chemical and Biochemical Engineering, School of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; <sup>2</sup>School of Chemistry and Life Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, Fujian, China)

**Abstract:** Five types of biochars were prepared through chemical activation utilizing fermentation residue from biogas plants. NaOH, KOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and ZnCl<sub>2</sub> were used as chemical activating agents. Biochars could absorb ammonia-nitrogen in biogas slurry. Biochar derived from KOH treatment (KOH-CC) showed better adsorption efficiency than the others. The adsorption process followed pseudo-second-order kinetics, and the adsorption isotherm could be fitted to Langmuir equation. Simulation test indicated that the maximum adsorption capacity could reach  $120 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . The properties of KOH-CC were characterized by BET, SEM, XRD and FTIR. The mechanism of ammonia-nitrogen adsorption was discussed.

**Key words:** methane; biogas residue; biochar; adsorption; ammonia-nitrogen; sorbent

### 引 言

在生物产甲烷系统中, 以猪粪或秸秆为原料其转化率为 10%~20%<sup>[1]</sup>, 意味着生物甲烷系统中, 沼液沼渣是该系统的主要副产物。沼液沼渣无害化、

资源化处理的效果与成本是影响生物甲烷系统的经济和社会效益的关键。

产甲烷是一个复杂的有机物厌氧分解过程, 导致排放的废水中含有高氨氮、磷酸盐、重金属等污染物。目前已报道用于沼液处理的方法有化学法、

2013-12-31 收到初稿, 2014-01-19 收到修改稿。

联系人: 李清彪。第一作者: 郑杨清 (1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB733505)。

Received date: 2013-12-31.

Corresponding author: Prof. LI Qingbiao, kelqb@xmu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China(2013CB733505).

反渗透法、蒸发浓缩法、电解法、电渗透法、生物法和吸附法等。其中吸附法具有低能耗、高效率等优点,但是吸附剂成本较高、吸附饱和后失效等问题,限制了吸附法的应用。

生物甲烷系统原料来源的复杂性,导致沼渣中重金属、碳、氮、磷等组成、存在形式变化大,含量高,使得后处理技术难度大,也更复杂<sup>[2]</sup>。如果把沼渣直接排放或用作动植物生长原料,沼渣里的砷等重金属会通过食物链进入人体,这将给人们的健康带来威胁<sup>[3]</sup>。而沼渣富含碳源,是制备生物质来源活性炭(生物炭)的良好材料。早在20世纪90年代,Namasivayam等<sup>[4-8]</sup>已尝试利用沼渣制备成吸附剂,有效地吸附了刚果红、酸性艳蓝和铬、铅等重金属。由于当时沼渣来源有限,研究者们随后转向以固体废弃物、植物果壳以及污泥<sup>[9-10]</sup>为原料制备的生物炭吸附剂的研究,并开发了生物炭处理污水的应用<sup>[11-14]</sup>。目前生物炭是国内外研究的热点之一,制备生物炭的方法有物理法、化学法以及物理化学法。相对来讲,化学法所需设备简单,易操作,有利于生物炭获得较大的比表面积,是制备生物炭的首选方法<sup>[15]</sup>。化学法分为两个步骤:先用化学试剂活化固体原料,然后将其转移到高温无氧条件下进行碳化,产物即为生物炭。Sun等<sup>[9]</sup>和Rozada等<sup>[10]</sup>均采用化学法制备的生物炭有效吸附了亚甲基蓝,张扬等<sup>[16]</sup>用化学法改性的玉米芯可作为氨氮吸附剂。

近年来,我国沼气工程大规模快速发展,处置剩余沼液沼渣成为棘手问题。每年都有大量的沼渣被填埋或者焚烧处理,不仅影响生态环境也浪费了资源。因此,本文以生物产甲烷的副产物沼渣为原料,采用化学活化法制备高吸附性能的生物炭,并将其应用于沼液的处理。沼液无害化后可重新用于生物产甲烷。通过本研究可以实现沼气工程副产物一体化处理,整个生物产甲烷系统更加集成高效,经济成本和环境效益达到最佳水平。

## 1 材料和方法

### 1.1 生物炭的制备方法

实验所用沼渣与沼液均来自成都遂宁市郊区的齐全养猪场沼气工程,先将沼液沼渣离心分离,等含水沼渣风干之后,在105℃条件下烘干。然后把干沼渣粉碎,用网筛过筛。5种活化剂分别是硫酸、氢氧化钠、磷酸、氢氧化钾、氯化锌,取上述沼渣样品按照固液比为1g:2.5ml加入活化剂溶液,

静置24h后将上清液除去。将残留的固体放入烘箱中烘干,然后转到高温管式炉里在氮气气氛下加热。在加热速度为 $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,热解温度为 $550^{\circ}\text{C}$ 状态下加热1h,热解装置如图1所示。等产物冷却后先用稀盐酸洗涤,再用去离子水洗涤。最后再烘干,研磨后于0.25mm网筛筛分,将不同活化剂改性的生物炭编号为 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-CC}$ 、 $\text{NaOH-CC}$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4\text{-CC}$ 、 $\text{KOH-CC}$ 、 $\text{ZnCl}_2\text{-CC}$ 。未经化学试剂处理的生物炭编号为N-CC。将这些生物炭放在干燥器中保存待用,沼液离心后置于冰箱冷藏。

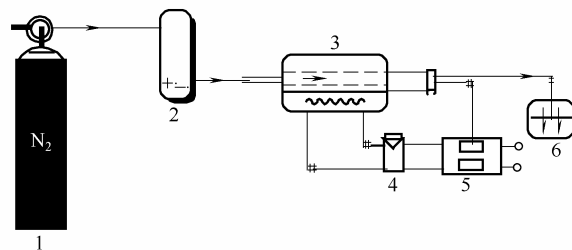


图1 热解实验装置

Fig. 1 Pyrolysis equipment for experiment

1—nitrogen cylinder; 2—rotameter; 3—tube furnace; 4—regulating transformer; 5—temperature controller; 6—recycling offgas

### 1.2 分析方法

沼渣的pH、固含率(TS)和挥发性固含率(VS)测定根据GB/T 7702—1997,采用中性洗涤剂法、 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸水解法、72%浓硫酸水解法及灰化法综合应用测定沼渣的半纤维素、纤维素和木质素的含量,用元素分析仪测定沼渣C、N、S、H的含量。分别用比表面积分析仪、扫描电子显微镜、XRD及红外分析生物炭的理化性质。

沼液样品经 $0.22\ \mu\text{m}$ 水系膜过滤后,用ICP-MS测定重金属浓度,分别根据纳氏试剂分光光度法、钼酸铵分光光度法、重铬酸钾法测定沼液的氨氮、磷酸盐及化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)的浓度。

### 1.3 吸附实验

配制浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮模拟沼液,量取50ml的模拟沼液分别加入50mg相应的生物炭吸附剂,室温 $25^{\circ}\text{C}$ 下在磁力搅拌器上快速搅拌12h后,抽真空过滤。测定经吸附后该污水的氨氮的浓度。

取50ml浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮溶液于100ml锥形瓶中,加入50mg KOH-CC吸附剂在 $25^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下振荡,于30、60、90、120、150、180、240、270和300min取样测定其氨氮的含量。通过准一级、准二级动力学模型及对实验所

得数据进行拟合以确定最佳的动力学模型。

配制一系列氨氮的浓度分别为 100、200、400、600、800、1000 mg · L<sup>-1</sup> 的模拟沼液，量取 50 ml 氨氮溶液分别加入 50 mg KOH-CC 吸附剂，室温 25℃ 下在磁力搅拌器上快速搅拌反应，抽真空过滤后检测氨氮的浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沼渣沼液的性质

本实验的沼渣和沼液样品由成都遂宁郊区的齐全养猪场沼气工程提供，是以猪粪和秸秆混合为原料发酵产甲烷的副产物。沼渣沼液呈弱碱性，沼渣中富含半纤维素、纤维素、木质素等物质，其碳、氮、硫、氢的含量分别为 27.58%，2.07%，1.05%，3.87%。沼渣含有丰富的碳源，是制备生物炭的理想原料<sup>[17-18]</sup>。沼液的 COD、磷酸盐、氨氮浓度分别为 777 mg · L<sup>-1</sup>，18 mg · L<sup>-1</sup>，1200 mg · L<sup>-1</sup>。沼液中还含有一些重金属，其中砷、镉、铬、铜、汞、铅、锌的浓度分别为 16.6 μg · L<sup>-1</sup>，0.1 μg · L<sup>-1</sup>，6.5 μg · L<sup>-1</sup>，199.5 μg · L<sup>-1</sup>，0.27 μg · L<sup>-1</sup>，1.92 μg · L<sup>-1</sup>，297.6 μg · L<sup>-1</sup>。

### 2.2 生物炭的吸附实验

2.2.1 活化方法对沼渣生物炭吸附效果的影响 利用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CC、NaOH-CC、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-CC、KOH-CC、ZnCl<sub>2</sub>-CC、N-CC 对 100 mg · L<sup>-1</sup> 氨氮吸附 12 h 到稳定状态。结果表明 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CC、NaOH-CC、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-CC、KOH-CC、ZnCl<sub>2</sub>-CC 与 N-CC 相比对氨氮都有较明显吸附作用。比较吸附效果，用 NaOH、KOH、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 活化的生物炭对氨氮的吸附容量达到 30 mg · g<sup>-1</sup> 以上，而 KOH-CC 能达到 80 mg · g<sup>-1</sup> 以上，结果如图 2 所示。

2.2.2 吸附动力学 通过 KOH-CC 的吸附动力学可以进一步研究其吸附氨氮的作用机理。在 25℃ 下，用准一级动力学方程  $q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$ 、准二级动力学方程  $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e t}$  对吸附动力学数据进行拟合<sup>[19]</sup>，式中， $q_e$ (mg · g<sup>-1</sup>) 和  $q_t$ (mg · g<sup>-1</sup>) 分别为平衡吸附量和  $t$  时刻吸附量； $t$ (min) 为反应时

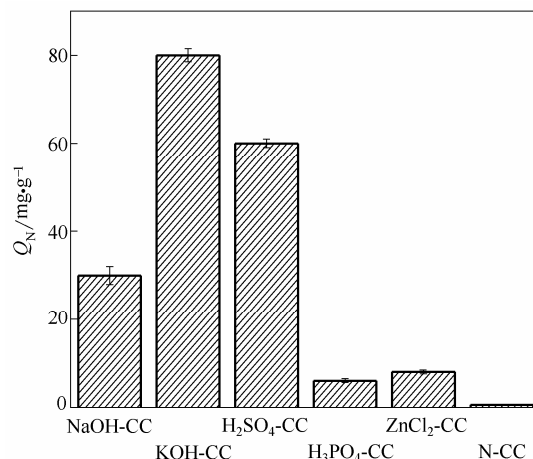


图 2 6 种生物炭对沼液中污染物的吸附效果

Fig. 2 6 kinds of biochars adsorption for ammonia-nitrogen

间； $k_1$ (min<sup>-1</sup>) 和  $k_2$ (g · mg<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>) 分别为准一级和准二级速率常数。具体拟合参数如表 1 所示，结果表明准二级动力学方程的拟合效果较好， $R^2$  达到 0.99 以上，且计算所得的平衡吸附量与实验所测值吻合。

2.2.3 吸附等温线 在 25℃ 下 KOH-CC 对沼液中氨氮的吸附等温线实验，采用 Langmuir 等温吸附模型

$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} b}$  和 Freundlich 等温吸附模型

$q_e = KC_e^{\frac{1}{n}}$  对吸附等温线数据拟合<sup>[20-21]</sup>，式中， $C_e$

(mg · L<sup>-1</sup>) 为平衡后溶液中剩余吸附质的浓度； $q_e$ (mg · g<sup>-1</sup>) 和  $q_{max}$ (mg · g<sup>-1</sup>) 分别为平衡吸附量和最大吸附量； $b$  和吸附强度有关； $n$  和  $K$  是 Freundlich 等温吸附模型方程参数，分别与吸附强度和吸附量有关。具体参数如表 2 所示，结果表明，在 25℃ 下 KOH-CC 对氨氮的吸附等温线更符合 Langmuir 模型，其对氨氮的最大吸附容量为 120 mg · g<sup>-1</sup>，KOH-CC 与天然沸石等其他吸附剂<sup>[16]</sup>相比对氨氮的吸附效果明显优越。

### 2.3 生物炭的结构和性质

2.3.1 BET 分析 沼渣和 KOH-CC 的比表面积及孔结构的测定结果如表 3 所示。

由表 3 可知，经过 KOH 活化处理后，KOH-CC 生物炭的比表面积增加。KOH-CC 的微孔比例很小，

表 1 不同动力学模型对 KOH-CC 吸附沼液中氨氮的拟合结果

Table 1 Kinetic constants for ammonia-nitrogen adsorption by KOH-CC obtained by different models

Sorbent	$C_0$ /mg · L <sup>-1</sup>	$q$ /mg · g <sup>-1</sup>	Pseudo first order kinetic			Pseudo second order kinetic		
			$q_e$ /mg · g <sup>-1</sup>	$k_1$ /min <sup>-1</sup>	$R^2$	$q_e$ /mg · g <sup>-1</sup>	$k_2$ /g · mg <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup>	$R^2$
KOH-CC	100	86	81.7	0.01474	0.975	88.4	0.00031	0.998

表 2 KOH-CC 对氨氮吸附等温线的拟合结果

Table 2 Langmuir and Freundlich constants for ammonia-nitrogen adsorption by KOH-CC

T/K	Sorbent	Langmuir			Freundlich		
		$q_m/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b/L \cdot \text{mg}^{-1}$	$R^2$	$K_f/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$(1/n)/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$R^2$
298	KOH-CC	120	0.0222	0.9856	57.88	0.0983	0.88946

表 3 沼渣和 KOH-CC 的孔结构性能参数

Table 3 Parameters of pore structure for biogas residue and KOH-CC

Sample	BET surface area/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	Total pore volume/ $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$	Mesopores volume/ $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$	Average pore radius/nm
biogas residue	6.39	0.013	0.0092	0.14
KOH-CC	229.58	0.30	0.20	0.66

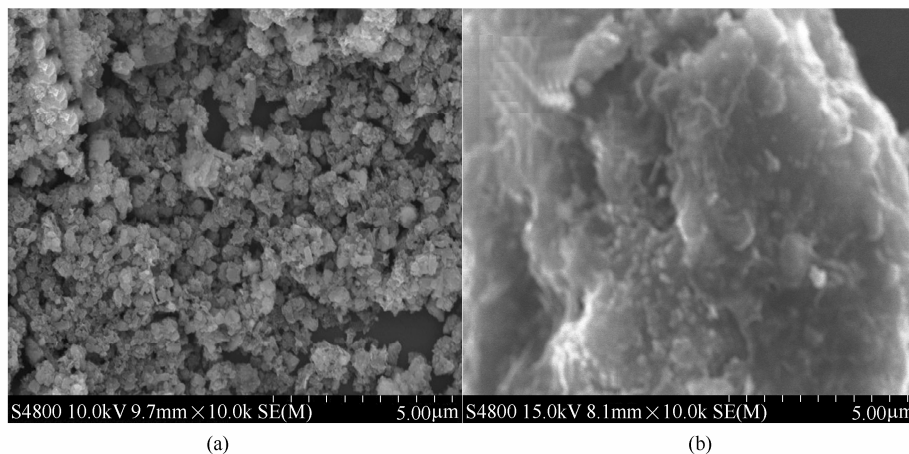


图 3 沼渣和 KOH-CC 的扫描电镜图

Fig 3 SEM images of biogas residue and KOH-CC

主要呈介孔结构,表明 KOH-CC 的介孔结构有利于对氨氮的吸附。

2.3.2 SEM 电镜分析 对沼渣和 KOH-CC 进行了扫描电镜,图 3(a)、(b)分别是沼渣和 KOH-CC 的扫描电镜图。从电镜图可以发现沼渣表面粗糙,用 KOH 活化后, KOH-CC 表面有不均匀的孔隙结构,这些不规则的孔状结构提供了生物炭的比表面积,促进离子吸附作用。

2.3.3 KOH-CC 的 XRD 分析 从吸附实验中发现 KOH-CC 对氨氮的吸附效果较好,于是对 KOH-CC 进行 XRD 表征分析。由 XRD 谱图也能反映生物炭对氨氮的吸附机理,图 4 分别为氢氧化钾活化制备的生物炭对氨氮吸附前后的 XRD 图。虽然生物炭属于非晶态物质,衍射图由少数漫散峰组成,但是可以看出吸附氨氮前后生物炭的结构发生了变化, KOH-CC 从吸附前的非晶形结构变成有部分晶形的结构。

2.3.4 红外分析 图 5 中 a、b、c 分别是沼渣、KOH-CC 以及吸附氨氮后的 KOH-CC 的红外光谱图。对比 a、b 两个谱图,发现由氢氧化钾改性后的

沼渣羟基的峰增强了,整体峰位置发生了红移。 $439 \text{ cm}^{-1}$  处的峰是 C—H 键弯曲振动峰,  $620.27 \text{ cm}^{-1}$  处出现了硫酸根的特征吸收峰,  $948.29 \text{ cm}^{-1}$  处的峰是碳水化合物中的 C—O 伸缩振动引起的,  $1384.17 \text{ cm}^{-1}$  处的峰是 C—C 键伸缩振动峰,  $1270.46 \text{ cm}^{-1}$  处出现 C—OH 键或脂肪酮的峰,  $1598.44 \text{ cm}^{-1}$  处的峰是芳香烃 C=C 键的伸缩振动导致的。 $2100 \text{ cm}^{-1}$  和  $2400 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰可能是弱的 C=C 伸缩振动峰的 C—H 峰,  $3423.21 \text{ cm}^{-1}$  处可能是伯胺或伯酰胺的 N—H 峰。说明生物炭的主要成分有 C、H、O、N、S。

当上述生物炭吸附氨氮之后,对比 b、c 谱图表明,  $1598.44 \text{ cm}^{-1}$  和  $3423.21 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰增强了,这是由于生物炭对氨氮吸附导致的。 $1270.46 \text{ cm}^{-1}$ 、 $2100 \text{ cm}^{-1}$  和  $2400 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰都消失了,说明生物炭表面的羟基、羰基及羧基对氨氮起吸附作用。

## 2.4 KOH-CC 处理沼液衡算

以一个  $500 \text{ m}^3$  生物产甲烷的示范装置为例,已知其发酵过程的副产物沼液是  $11 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,沼渣是

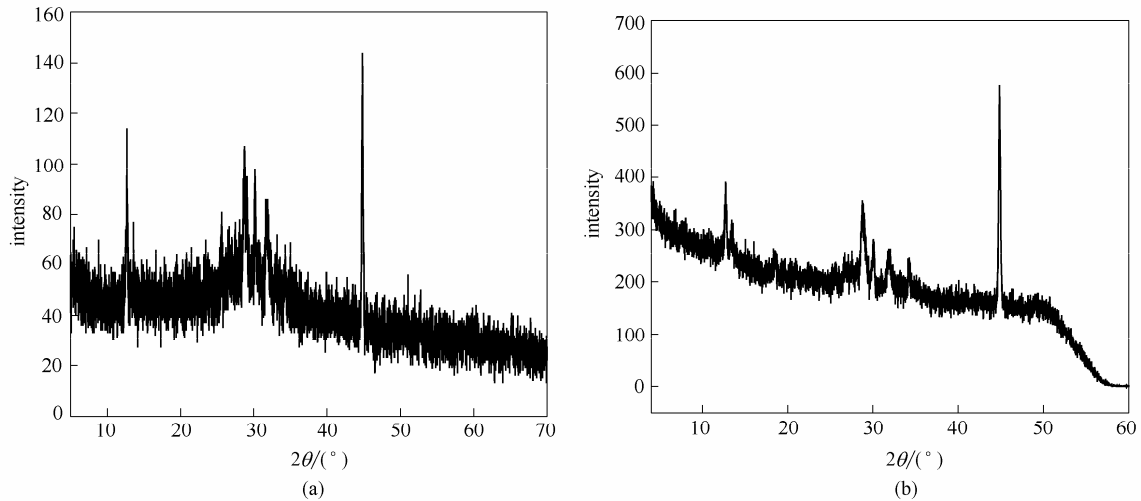


图 4 KOH-CC 和 KOH-CC 吸附氨氮后的谱图

Fig 4 XRD patterns of KOH-CC(a) and KOH-CC after adsorbing of ammonia-nitrogen(b)

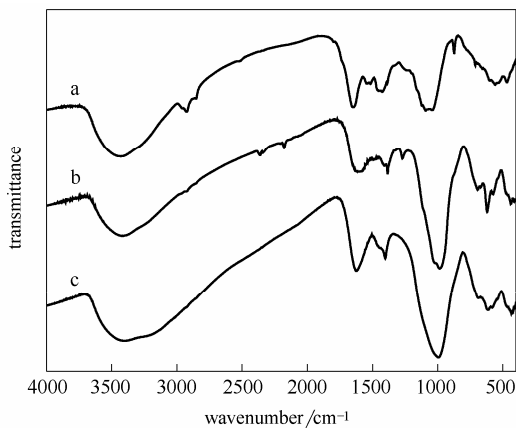


图 5 沼渣、KOH-CC 以及吸附氨氮后的 KOH-CC 的红外光谱图对比

Fig 5 FTIR of biogas slurry residual, KOH-CC and KOH-CC after adsorbing of ammonia-nitrogen

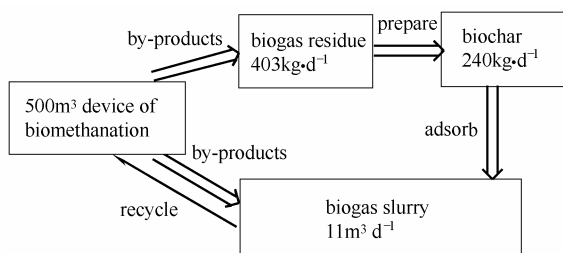


图 6 KOH-CC 处理沼液衡算

Fig. 6 Balance of treatment biogas slurry by KOH-CC

403 kg · d<sup>-1</sup>, 沼液的平均氨氮浓度为 1500 mg · L<sup>-1</sup>。若根据本文所述工艺, 通过计算沼渣可制成 240 kg 的生物炭吸附剂, 从吸附等温线实验可知 KOH-CC 对氨氮最大吸附容量为 120 mg · g<sup>-1</sup>, 利用这些生物

炭总共可以吸附 28.8 kg 的氨氮, 而每天排放沼液的氨氮只有 16.5 kg。根据理论计算, 制成的 KOH-CC 吸附剂足够用来处理每天排放的沼液。实际上在沼液浓度为 100 mg · L<sup>-1</sup> 时, KOH-CC 对氨氮的去除率可以达到 80%。KOH-CC 处理沼液衡算如图 6 所示。

### 3 结 论

(1) 以猪粪和秸秆为原料发酵产甲烷的副产物沼渣含有丰富的碳源, 可以用作制备生物炭, 用硫酸、氢氧化钠、磷酸、氢氧化钾、氯化锌活化制备的生物炭对氨氮都有一定的吸附作用。用 KOH 活化的生物炭对氨氮的吸附效果较好, 分析原因不仅是因为生物炭具有多孔结构, 还有它表面的羟基、酮及羧基对氨氮起吸附作用。

(2) KOH-CC 对氨氮的吸附在 5 h 内基本达到平衡, 且吸附过程符合准二级动力学模型, 吸附等温线符合 Langmuir 模型。

(3) 制成的 KOH-CC 足够用来处理每天排放的沼液, 有助于达到以废制废, 沼气工程零污染排放的目的。

### References

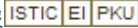
- [1] Wang G, Gavala H N, Skiadas I V, Ahring B K. Wet explosion of wheat straw and codigestion with swine manure: Effect on the methane productivity[J]. *Waste Management*, 2009, **29**(11): 2830-2835
- [2] Wu X, Yao W, Zhu J, Miller C. Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source[J]. *Bioresour Technol*, 2010, **101**(11): 4042-4047

- [3] Nickson R, McArthur J, Burgess W, Ahmed K M, Ravenscroft P, Rahmann M. Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater[J]. *Nature*, 1998, **395**(6700): 338-338
- [4] Namasivayam C, Yamuna R. Utilizing biogas residual slurry for dye adsorption[J]. *American Dyestuff Reporter*, 1994, **83**(8): 1-5
- [5] Namasivayam C, Kavitha D. Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste[J]. *Dyes and Pigments*, 2002, **54**(1): 47-58
- [6] Namasivayam C, Yamuna R. Adsorption of chromium (VI) by a low-cost adsorbent: biogas residual slurry[J]. *Chemosphere*, 1995, **30**(3): 561-578
- [7] Namasivayam C, Prabha D, Kumutha M. Removal of direct red and acid brilliant blue by adsorption on to banana pith[J]. *Bioresource Technology*, 1998, **64**(1): 77-79
- [8] Namasivayam C, Yamuna R. Waste biogas residual slurry as an adsorbent for the removal of Pb (II) from aqueous solution and radiator manufacturing industry wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 1995, **52**(2): 125-131
- [9] Sun L, Wan S, Luo W. Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: characterization, equilibrium, and kinetic studies[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **140**: 406-413
- [10] Rozada F, Otero M, Moran A, Garcia A I. Activated carbons from sewage sludge and discarded tyres: production and optimization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **124**(1): 181-191
- [11] Pietrzak R, Badosz T J. Activated carbons modified with sewage sludge derived phase and their application in the process of NO<sub>2</sub> removal[J]. *Carbon*, 2007, **45**(13): 2537-2546
- [12] Özçimen D, Karaosmanoğlu F. Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake[J]. *Renewable Energy*, 2004, **29**(5): 779-787
- [13] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, Ahmedna M, Watts D W, Niandou M A. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, **174**(2): 105-112
- [14] Xu X, Cao X, Zhao L, Wang H, Yu H, Gao B. Removal of Cu, Zn, and Cd from aqueous solutions by the dairy manure-derived biochar[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(1): 358-368
- [15] Liu Z, Zhang F S. Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **167**(1): 933-939
- [16] Zhang Yang(张扬), Li Zifu(李子富), Zhang Lin(张琳), Zhao Ruixue(赵瑞雪). Adsorption of ammonium by modified corn cob biochars from aqueous solution[J]. *CIESC Journal(化工学报)*, 2014, **65**(3): 960-966
- [17] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 143-144
- [18] Luo Xianping(罗仙平), Li Jianchang(李健昌), Yan Qun(严群), Liu Jun(刘俊), Feng Dan(封丹), Huang Junwen(黄俊文). Screening of optimum adsorbents for treating wastewater containing low concentration ammonia-nitrogen[J]. *CIESC Journal(化工学报)*, 2010, **61**(1): 216-222
- [19] Rudzinski W, Plazinski W. Kinetics of solute adsorption at solid/solution interfaces: A theoretical development of the empirical pseudo-first and pseudo-second order kinetic rate equations, based on applying the statistical rate theory of interfacial transport[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, **110**(33): 16514-16525
- [20] Maranon E, Ulmanu M, Fernandez Y, Anger I, Castrillon L. Removal of ammonium from aqueous solutions with volcanic tuff[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **137**(3): 1402-1409
- [21] Li Hongyan(李红艳), Li Yaxin(李亚新), Sun Donggang(孙东刚). Screening of cation exchange resins for treating wastewater containing high concentration ammonia[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)(化工学报)*, 2008, **59**(9): 2339-2345

## 沼渣制备生物炭吸附沼液中氨氮

作者: [郑杨清](#), [郁强强](#), [王海涛](#), [王远鹏](#), [何宁](#), [沈亮](#), [李清彪](#), [ZHENG Yangqing](#), [YU Qiangqiang](#),  
[WANG Haitao](#), [WANG Yuanpeng](#), [HE Ning](#), [SHEN Liang](#), [LI Qingbiao](#)

作者单位: [郑杨清, 郁强强, 王海涛, 王远鹏, 何宁, 沈亮, ZHENG Yangqing, YU Qiangqiang, WANG Haitao, WANG Yuanpeng, HE Ning, SHEN Liang](#)(厦门大学化学化工学院化学工程与生物工程系, 福建厦门, 361005), [李清彪, LI Qingbiao](#)(厦门大学化学化工学院化学工程与生物工程系, 福建厦门 361005; 泉州师范学院化学与生命科学学院, 福建泉州 362000)

刊名: [化工学报](#) 

英文刊名: [CIESC Journal](#)

年, 卷(期): 2014(5)

引用本文格式: [郑杨清](#). [郁强强](#). [王海涛](#). [王远鹏](#). [何宁](#). [沈亮](#). [李清彪](#). [ZHENG Yangqing](#). [YU Qiangqiang](#). [WANG Haitao](#). [WANG Yuanpeng](#). [HE Ning](#). [SHEN Liang](#). [LI Qingbiao](#) 沼渣制备生物炭吸附沼液中氨氮[期刊论文]-[化工学报](#) 2014(5)