

沼液回流对牛粪厌氧发酵产气特性及其动力学的影响*

吴树彪 黎佳茜 李 伟 董仁杰

(中国农业大学生物质能源工程与低碳技术研究室, 北京 100083)

摘要: 在中温条件(37±1)℃下采用连续搅拌反应器(CSTR)研究了沼液长期回流对牛粪厌氧发酵过程中产气特性及其微生物动力学的影响,对不同有机负荷下发酵罐运行参数的动态变化进行了持续监测,并进行了相关的动力学分析。结果表明:在水力停留时间为40 d,有机负荷为3.0 g/(L·d)的条件下,将50%的沼液进行回流时,能够提高基质产甲烷率,促进厌氧发酵系统中微生物的合成代谢,但由于难降解物质累积,传质效果降低仍使得回流组日产气量及甲烷产量呈下降趋势,处理组的沼气容积日产气量从1.07 L/L逐渐降至0.83 L/L,降低了22.4%。沼液回流引起了pH值、NH₄⁺-N、溶解性化学需氧量(SCOD)等指标的升高,但未达到抑制水平。回流导致牛粪厌氧发酵产气量下降的最主要因素可能是由于粘度从50 mPa·s迅速升高至116 mPa·s而引起的传热传质阻力变大。在以牛粪为原料的沼气工程应用沼液回流工艺时需要合理选择回流比例或在回流前对沼液进行适当的处理来保证工程的长期稳定运行。

关键词: 牛粪 厌氧发酵 回流 动力学

中图分类号: S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0241-06

Effect of Liquid Digestate Recirculation on Biogas Production and Fermentation Kinetics for Anaerobic Digestion of Cattle Manure

Wu Shubiao Li Jiayi Li Wei Dong Renjie

(Bio-Energy Engineering and Low Carbon Technology Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of recirculating the liquid fraction of digestate on the mesophilic anaerobic digestion of cattle manure was investigated using laboratory-scale continuous stirred tank reactors. The hydraulic retention time (HRT) of 40 d was employed. Recirculation was implemented after the anaerobic digestion process was stable at the organic loading rate of 3.0 g/(L·d). However, the recirculation eventually caused the accumulation of organic and inorganic substances, which led to the inhibition of hydrolysis and methanogenesis. The daily biogas yield was decreased by 22.4% when the liquid fraction of digestate was recirculated to substitute 50% of the tap water used for feedstock dilution. The concentrations of ammonia and volatile fatty acids did not reach the inhibitory levels. However, the accumulation of refractory organics, which were more pronounced in the recycling reactors, led to the decrease of methane production. According to the results of kinetic analysis, the microbial anabolism was promoted by the recirculation. The results indicate that choosing a proper recirculation rate and adopting reasonable pretreatment measures are indispensable to avoid the negative influence caused by the accumulation of potentially harmful substances. The proposed approach will lower the amount of generated effluents, and the product of anaerobic digestion with this method will contain high solid content, which will decrease the transportation costs and the storage capacity requirements.

Key words: Cattle manure Anaerobic digestion Recirculation Kinetics

收稿日期: 2014-12-24 修回日期: 2015-01-13

*北京市科技计划课题资助项目(D141100001214002、Z151100001115010)

作者简介: 吴树彪, 讲师, 博士, 主要从事废弃物处理与资源化利用研究, E-mail: wushubiao@gmail.com

通讯作者: 董仁杰, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质能源工程与低碳技术研究, E-mail: rjdong@cau.edu.cn

引言

随着我国畜牧业集约化的迅速发展,畜禽粪便大量产生。粪便养分含量高,污染潜力大,为了减少其对环境的影响,将粪便进行能源化处理的沼气厌氧发酵技术得到了广泛的应用^[1]。然而,沼气发酵生产甲烷的同时还产生了大量的沼液。还田利用是一种有效的沼液减量化方式^[2],但由于农田分散、季节性耕种等原因,沼液还田无法充分实现^[3-5]。而现有的沼液深度处理技术又存在技术工艺复杂,运行成本高等问题^[6]。因此,如何实现低成本、高效率的沼液减量处理成为制约沼气工程发展的瓶颈。

随着干清粪工艺的推广,粪便与废水分开处理的模式在规模化畜禽养殖场得到了越来越多的应用^[7]。干清粪的粪便固体含量一般在 20% 左右,用沼液将其稀释到适宜的厌氧发酵浓度(8% ~ 10%)是一种目前工程上应用最多且较为经济、有效的沼液减量处置方式^[8]。此外,沼液适当回流还能够增加原料利用率,提高厌氧发酵效率,增强系统运行稳

定性^[9]。但是在研究和实际调研中也发现,过度回流会对发酵过程产生不利影响,如可溶性轻金属盐离子浓度升高、氨氮浓度升高、胶体物质增加等^[10-12],可能导致发酵产气量下降。牛粪作为厌氧发酵常见的原料之一,研究回流对其发酵过程的影响在工程中有重要意义。本文在中温条件(37 ± 1)℃下采用连续搅拌反应器(CSTR)研究沼液长期回流对牛粪厌氧发酵过程中产气特性及其微生物动力学的影响,并进行相关的动力学分析,以期为实际沼气工程的运行提供有益借鉴。

1 实验原料与方法

1.1 牛粪及污泥特性

发酵原料牛粪取自江苏连云港某农场,取回的牛粪经粗拣、自然晒干后再用高速粉碎机(ks613640型,北京)粉碎至粒径小于 2 mm 并装袋备用。接种污泥取自实验室牛粪中温厌氧发酵剩余物,适当加水稀释至实验所需体积,中温驯化 14 d 至不再产气后用作启动本实验的接种物(pH 值为 7.50 ± 0.05)。牛粪和接种污泥的理化指标如表 1 所示。

表 1 牛粪及接种污泥的特性(质量分数)
Tab.1 Characteristics of cattle manure and sludge inoculums %

原料	总固体(TS)	挥发性固体(VS)	C	N	纤维素	半纤维素	木质素
牛粪	86.24	66.05	35.57	1.61	33.65	25.91	7.98
接种污泥	0.93	0.45					

1.2 实验装置及操作

实验采用 2 个体积为 25 L 的 CSTR 反应器(图 1)进行单相半连续厌氧发酵,有效发酵体积为 20 L,水力停留时间(HRT)为 40 d。发酵罐每隔 3 h 以 40 r/min 的转速搅拌 30 min。实验具体过程如下:

在中温条件(37 ± 1)℃下,发酵罐接种 20 L 驯化污泥后从有机负荷 1.0 g/(L·d)开始启动,每天定时用经过自来水稀释的干牛粪进料。当沼气日产量、甲烷体积分数、pH 值稳定后开始提升有机负荷,每隔一个 HRT 提升 1.0 g/(L·d)。80 d 后有机负荷提高为 3.0 g/(L·d),在此负荷下稳定运行至 110 d (阶段 III)后,处理组开始回流沼液,具体步骤为:用 350 目尼龙纱网过滤每日出料,将滤液与清水以 1:1 体积比(回流比为 50%)混合均匀后用于进料稀释回流至发酵罐,对照组仍使用清水稀释,实验继续运行至第 190 天(阶段 IV)结束。

1.3 实验监测方法

总固体和挥发性固体质量分数采用干燥法测定^[13];pH 值采用玻璃电极法(Orion 5-Star 型,美

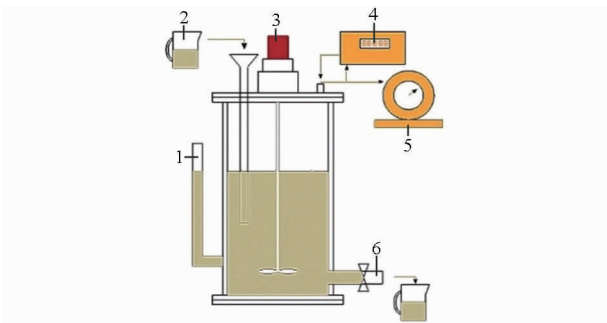


图 1 实验用 CSTR 厌氧发酵装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of CSTR used for experiment
1. 液位计 2. 进料口 3. 搅拌器 4. 气体分析仪 5. 气体流量计 6. 出料口

国)测定;C、N 用元素分析仪(Vario EL cube 型,德国)测定;总挥发性脂肪酸(TVFA)与总无机碳(TIC)采用 Nordmann 2 点联合滴定法^[14]测定(TVFA 以乙酸计,碱度以碳酸钙计);氨氮采用水杨酸-次氯酸盐光度法^[15]测定;沼气日产量用湿式气体流量计(LML-1 型,中国)测定;甲烷体积分数采用便携式沼气分析仪(Geotech Biogas 5000 型,英国)测定;SCOD 质量浓度用重铬酸钾法^[15]测定;纤

纤维素、半纤维素、木质素含量根据范氏洗涤法采用纤维素分析仪(ANKOM 220i 型,美国)测定;粘度采用旋转粘度仪(NDJ-5S 型,上海)测定。

2 结果与讨论

2.1 沼液回流对沼液理化特性的影响

如图 2 和图 3 所示,在阶段 IV,沼液回流 80 d 后,回流处理组粘度、SCOD 质量浓度、TIC 质量浓度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度分别达到 116 mPa·s、5 000 mg/L、10 000 mg/L(CaCO_3 含量)、530 mg/L,都明显高于未回流对照组的 56 mPa·s、3 000 mg/L、4 300 mg/L、380 mg/L。

在回流阶段,沼液回流实验组粘度从 50 mPa·s 迅速增至 116 mPa·s,明显高于对照组的 56 mPa·s。这可能是有由于牛粪中纤维素、半纤维素类等难降解物质含量较高、降解慢;而且沼液经尼龙纱布过滤得到的滤液挥发性固体质量分数随回流天数逐渐增加,30 d 后稳定在 $(10.53 \pm 0.15)\%$,用其

代替自来水稀释干牛粪进料在一定程度上增加了每日进料负荷;回流阶段实验组的 VS 去除率从 49.3% 经 30 d 降至 $(35.7 \pm 1.0)\%$ 的稳定状态,低于对照组,沼液中未充分降解的大分子物质随回流不断累积,使得沼液中悬浮物质和胶体物质增加,导致沼液粘度逐渐增大。厌氧发酵产物的流变性会影响厌氧反应器的整体混合行为、物质传递和热传递过程,从而影响生物化学反应和细胞的新陈代谢,进而影响反应器内的生物反应动力学^[16]。本实验中随着回流的进行,沼液粘度不断增加,发酵罐搅拌效果明显下降,罐内出现结壳现象,厌氧反应产生的部分气体因难以溢出而滞留在液体中,导致进料困难、沼液面上升,但在本实验中未出现沼液溢出现象。粘度过大不仅阻碍了微生物与有机物之间的传质过程,也会降低厌氧消化系统的产气性能,目前关于沼液粘度对厌氧发酵过程产气特性影响的报道较少,还需要更深入的研究^[16]。

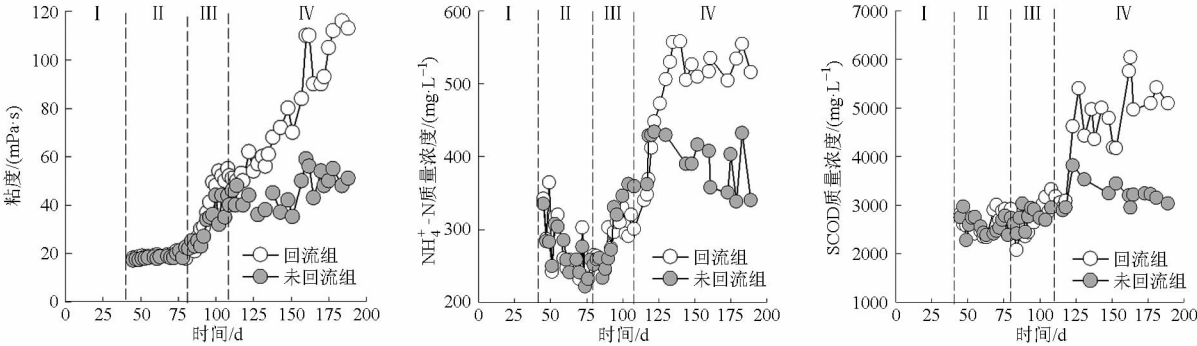


图 2 牛粪在不同运行条件下的粘度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度、SCOD 质量浓度变化

Fig. 2 Viscosity, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and SCOD of cattle manure under different operation conditions

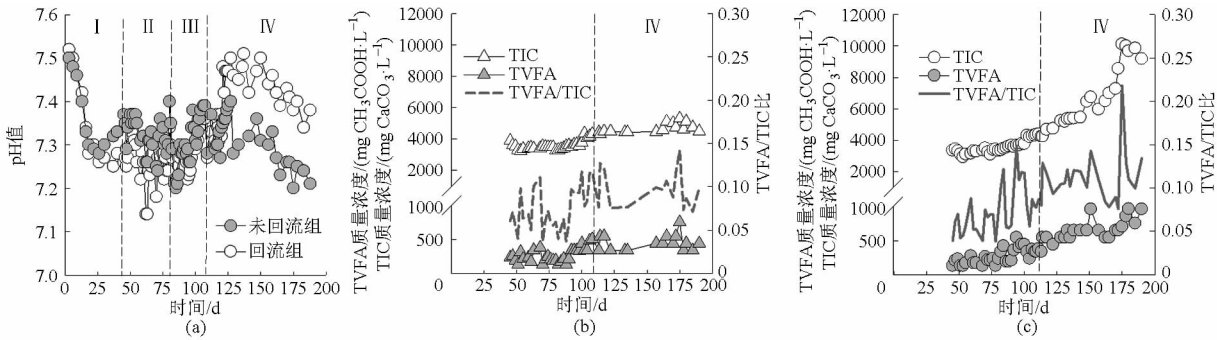


图 3 牛粪在不同运行条件下的 pH 值、TVFA、TIC 质量浓度变化

Fig. 3 Values of pH, TVFA and TIC of cattle manure under different operation conditions

(a) pH 值 (b) 未回流组 (c) 回流组

沼液回流造成的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积对厌氧微生物活性的影响一直备受关注。在厌氧发酵的产甲烷阶段,产氨细菌代谢活跃,使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度增高,随着沼液回流运行天数的增加沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 慢慢累积。作为氮源,少量游离氨被用于微生物细胞合成,而过高的游离氨会通过细胞膜破坏细胞内生化

平衡,对敏感的产甲烷菌造成伤害^[17]。一般情况下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在 1 500 mg/L 以下不会对厌氧微生物表现出明显的抑制作用^[17-18]。本牛粪发酵实验中,处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度并不是一直累积,而是在回流运行初期由 310 mg/L 快速增长至 580 mg/L 后随着微生物对环境变化的适应而稳定,

虽然明显高于对照组的 380 mg/L,但未达到文献报道的抑制范围,这可能是因为本实验采用的牛粪原料中氮元素含量较低的缘故。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也是厌氧缓冲体系的致碱物质,其浓度变化直接影响 pH 值变化。因此沼液回流增加了阶段 IV 回流组的 TIC 质量浓度使其由 4 000 mg/L 逐渐增加至 10 000 mg/L,远高于对照组的 4 300 mg/L,增强了系统的缓冲能力。这也是此阶段处理组的 pH 值高于对照组的原因。尽管回流过程中沼液回流组 TVFA/TIC 比有所增加,但其仍然小于 0.3,仅表现为 pH 值的降低,未影响系统的相对稳定性。

综合以上讨论的各理化指标变化可知,对于处理牛粪的沼气工程,长期沼液回流时,粘度增加带来的搅拌、物质传递和热传递困难是首要问题,厌氧发酵水解阶段是限制步骤。针对沼液回流引起的物质累积有可能造成微生物活性受抑制的问题,Estevez 等^[19]在实验中建议采用适当的回流比来平衡系统中 TVFA、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、VS 等的含量。

2.2 沼液回流对产气量及甲烷体积分数的影响

沼气产量、甲烷体积分数是衡量厌氧消化系统运行效率的基础指标。图 4 描述了实验采用的牛粪在不同运行条件下的沼气容积产气量、甲烷体积分

数及甲烷容积产气量变化。随着有机负荷的逐渐提高,未进行沼液回流的对照组和沼液回流的处理组的沼气容积产气量和甲烷容积产气量都逐渐增加。在回流阶段(IV),沼液回流使厌氧发酵的产气量降低,甲烷容积日产气量从阶段 III 的 0.50 L/L 逐渐降低至 0.46 L/L,下降了 8.2%;沼气容积日产气量则从 1.07 L/L 降至 0.83 L/L,下降了 22.4%。从回流对沼液理化特性的影响可知,回流引起未完全降解物质的累积,导致处理组的 VS 去除率下降,进而使得沼液粘度增大,传质效果变差,从而降低了产气性能。这与王文政^[16]在研究沼液回流对玉米秸秆厌氧发酵产气性能影响时得出的回流对日产气量无明显作用的结果不太相同,这可能与该研究中相对较低的沼液粘度有关。Jarvis 等^[20]曾指出沼液回流会造成物质的不断积累并逐渐打破发酵体系内各物质间的平衡,最终达到一个新的稳定状态。Jarvis 等在进行以青贮饲料为原料的两相厌氧发酵沼液回流的实验中发现,沼液回流增加了系统中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 Na^+ 、 K^+ 浓度,随着这些物质的累积产甲烷菌活性逐渐被抑制,从而降低甲烷产量,而在本实验中虽然也出现了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等物质的累积现象但都未达到现有报道的抑制水平,甲烷容积日产气量降低可能还是与粘度有关。

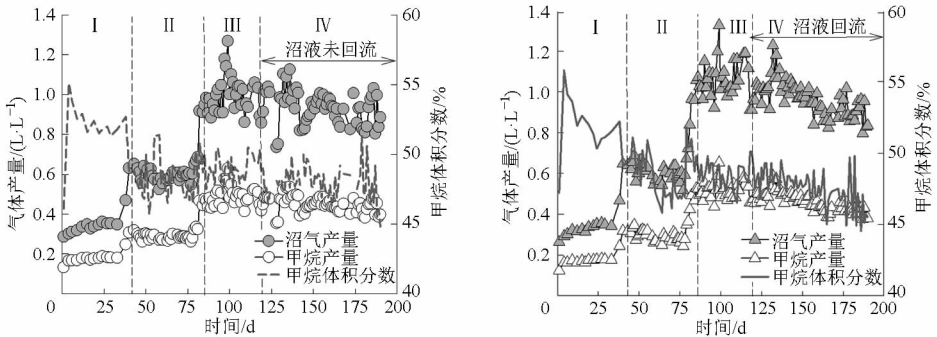


图 4 牛粪在不同运行条件下的沼气容积产气量、甲烷体积分及甲烷容积产气量
Fig.4 Biogas production of cattle manure under different operation conditions

2.3 沼液回流对基质衡算模型参数的影响

对厌氧消化过程进行动力学模型分析,能更好地描述和预测厌氧消化系统的基质产气率、系统运行稳定性等,对于反应器的设计、工艺优化及过程控制具有重要的指导意义。固体有机废弃物厌氧消化时,本研究采用挥发性固体(VS)为指标进行物料衡算^[21-22],计算式为

$$QS_i = QS_e + q_{\text{biogas}} Y_{\text{S/G}} \tag{1}$$

式中 Q ——流量, L/d
 S_i ——进料中基质的 VS 质量浓度, g/L
 S_e ——反应器出料中 VS 的质量浓度, g/L
 q_{biogas} ——沼气日产量, L/d
 $Y_{\text{S/G}}$ ——基质转换为沼气的转换系数,即生

成 1 L 沼气所消耗的 VS 量, g/L
将式(1)的两端同时除以反应器的体积 V , 而 V/Q 为反应物料在反应器中的水力停留时间 (t_{HRT}), 故可转换为

$$\frac{S_i - S_e}{t_{\text{HRT}}} = Y_{\text{S/G}} \frac{q_{\text{biogas}}}{V} \tag{2}$$

以 q_{biogas}/V 为横坐标, $(S_i - S_e)/t_{\text{HRT}}$ 为纵坐标进行绘图, 斜率即为 $Y_{\text{S/G}}$ 。因此如图 5 所示, 未回流对照组和沼液回流处理组的基质转换为沼气的转换系数 ($Y_{\text{S/G-biogas}}$) 分别为 1.734 4、1.482 1 g/L 沼气; 根据相同的原理, 可计算出对照组和处理组中基质转换为甲烷的转换系数 ($Y_{\text{S/G-methane}}$) 分别为 3.567 7、3.067 4 g/L 甲烷。

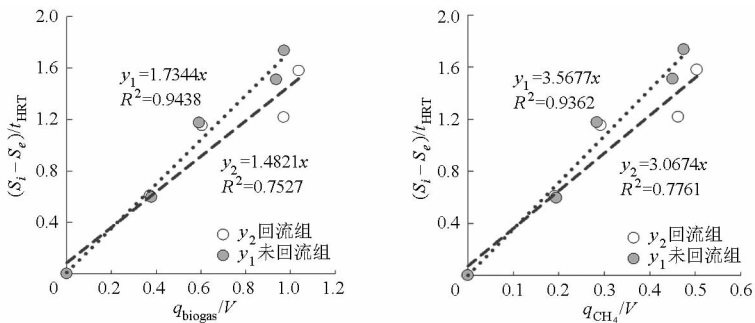


图 5 基质去除率与容积产气率的函数关系

Fig. 5 Volumetric biogas and methane production rate as a function of substrate removal rate

将 $Y_{S/G\text{-methane}}$ 取倒数即可进一步得出基质的单位产甲烷率,经转换计算,对照组和处理组的基质产甲烷率分别为 0.280 3、0.326 0 L/g,结果表明回流使基质的产甲烷率提高了 16.3%;这可能是由于沼液回流增加了系统中产甲烷菌的浓度,从而在一定程度上提高了基质的转化效率^[16]。根据相同的计算方法,Wei 等^[23]和 Guo 等^[24]指出餐厨垃圾和猪粪在中温条件下的基质产甲烷率分别为 0.419、0.587 L/g,两者均高于本研究中牛粪的甲烷产率,这可能是由于不同原料的降解性差异导致的。回流虽然增加了基质的产甲烷率,但由于粘度增加引起的传质困难给有机物的去除造成了不利影响,VS 去除率下降,回流组的产气性能与对照相比呈下降趋势。

2.4 沼液回流对微生物浓度的影响

根据 1 mol 甲烷完全氧化需要消耗 2 mol O₂,可计算出甲烷与 COD 的函数关系为每降解 2.86 g COD 能产生 1 L CH₄(标准状况)^[23]。2.3 节中对照

组和处理组中基质转化为甲烷的转化系数分别为 3.567 7、3.067 4 g/L,因此 VS 去除率与 COD 的函数关系在未回流组为 VS 去除率与 COD 的比值约 0.802,在回流组为 VS 去除率与 COD 的比值约 0.933。由图 6 可看出,随着基质去除率提高,甲烷容积产气率也逐渐增加,斜率分别代表对照组和处理组中分别有 99.29%、98.03% 的 COD 被用于生成甲烷,即对照组和处理组中分别有 0.71% 和 1.97% 的 COD 用于合成新的微生物细胞。微生物细胞的经验分子式为 C₃H₇O₂N,其 COD 当量为 1.4 g/g;因此对照组和处理组的微生物产率分别为 0.005、0.014 g/g,可以看出沼液回流促进了厌氧消化系统中微生物合成代谢,这也是回流处理组基质的甲烷产率较高的一个因素;Chen 等^[25]指出垃圾渗滤液的微生物产率系数为 0.057 g/g,高于牛粪的微生物产率系数,这可能是由于牛粪自身含有大量厌氧微生物,而有机废水本身不含有厌氧微生物,处理时需大量合成新的微生物。

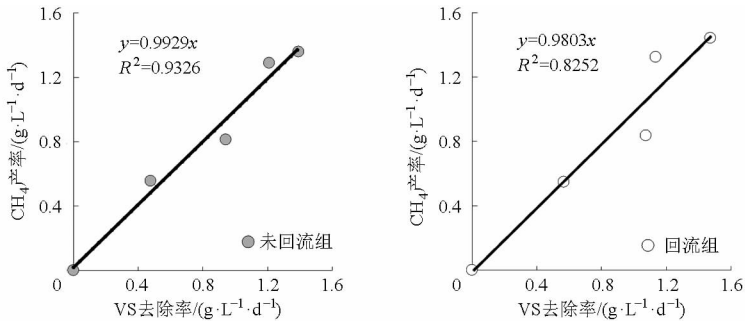


图 6 VS 去除率与甲烷容积产气率的函数关系

Fig. 6 Volumetric methane production rate as a function of VS removal rate

3 结束语

对于以牛粪为单一原料的中温连续厌氧发酵,当有机负荷为 3.0 g/(L·d),将 50% 的沼液用于回流时,发酵罐内的 SCOD、粘度等各理化指标较未回流对照组均有明显增加,但 NH₄⁺-N 质量浓度和 TVFA/TIC 比仍在安全范围。通过动力学分析说明

回流提高了基质产甲烷率,促进了厌氧消化系统中微生物合成代谢,但由于难降解物质累积,传质效果降低仍使得回流组日产气量及甲烷产量呈下降趋势,不利于长期运行的系统稳定。在以牛粪为原料的沼气工程应用沼液回流工艺时,需要合理选择回流比例或在回流前对沼液进行适当的处理以降低沼液中可能对发酵过程产生不利影响的物质的含量。

参 考 文 献

1 Weiland P. Biogas production: current state and perspectives [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(4): 849 – 860.

2 Arthurson V. Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land-potential benefits and drawbacks [J]. *Energies*, 2009, 2(2): 226 – 242.

3 王馨仪, 郭建斌, 吴树彪, 等. 发酵液回流对餐厨垃圾厌氧消化的影响 [J]. *环境工程*, 2012, 30(5): 77 – 81.
Wang Xinyi, Guo Jianbin, Wu Shubiao, et al. The effect of slurry recirculation on anaerobic digestion performance of kitchen waste [J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(5): 77 – 81. (in Chinese)

4 于明河. 浅谈沼气发酵产物综合利用应用技术 [J]. *农业工程技术: 新能源产业*, 2013(3): 22 – 24.

5 Jiang X, Sommer S G, Christensen K V. A review of the biogas industry in China [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 6073 – 6081.

6 隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 等. 沼液深度处理技术研究与应用现状 [J]. *中国农业科技导报*, 2011, 13(1): 83 – 87.
Sui Qianwen, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Present status of biogas effluent treatment technology research and application [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(1): 83 – 87. (in Chinese)

7 章保. 规模化奶牛养殖场粪污处理应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.

8 杜倩, 李文哲, 姜海涛, 等. 消化液回用对牛粪两相厌氧消化的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2011, 42(2): 33 – 37.
Du Qian, Li Wenzhe, Jiang Haitao, et al. Effects of recycled digestive effluent on two-phase anaerobic digestion process of cow manure [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(2): 33 – 37. (in Chinese)

9 Chen L, Jlang W Z, Kitamura Y, et al. Enhancement of hydrolysis and acidification of solid organic waste by a rotational drum fermentation system with methanogenic leachate recirculation [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(11): 2194 – 2200.

10 Hu Y, Shen F, Yuan H, et al. Influence of recirculation of liquid fraction of the digestate (LFD) on maize stover anaerobic digestion [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 127: 189 – 196.

11 Shahrlari H, Warith M, Hamoda M, et al. Effect of leachate recirculation on mesophilic anaerobic digestion of food waste [J]. *Waste Management*, 2012, 32(3): 400 – 403.

12 Nordberg Å, Jarvis Å, Stenberg B, et al. Anaerobic digestion of alfalfa silage with recirculation of process liquid [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1): 104 – 111.

13 贺延龄. 废水厌氧生物处理 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 10 – 20.

14 Rieger C, Weiland P. Prozessstörungen frühzeitig erkennen [J]. *Biogas Journal*, 2006, 4(6): 18 – 20.

15 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

16 王文政. 沼液回流对玉米秸秆厌氧发酵产气性能的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

17 Yenig N O, Demirel B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a review [J]. *Process Biochemistry*, 2013, 48(5 – 6): 901 – 911.

18 Chen Y, Cheng J J, Creamer K S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(10): 4044 – 4064.

19 Estevez M M, Sapci Z, Linjordet R, et al. Semi-continuous anaerobic co-digestion of cow manure and steam-exploded *Salix* with recirculation of liquid digestate [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 136: 9 – 15.

20 Jarvis Å, Nordberg Å, Mathisen B, et al. Stimulation of conversion rates and bacterial activity in a silage-fed two-phase biogas process by initiating liquid recirculation [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1995, 68(4): 317 – 327.

21 Borja R, Gonzlez E, Rapposo F, et al. Kinetic analysis of the psychrophilic anaerobic digestion of wastewater derived from the production of proteins from extracted sunflower flour [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(16): 4628 – 4633.

22 Guo J, Dong R, Clemens J, et al. Performance evaluation of a completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at a low range of mesophilic conditions [J]. *Waste Management*, 2013, 33(11): 2219 – 2224.

23 Wei Q, Zhang W, Guo J, et al. Performance and kinetic evaluation of a semi-continuously fed anaerobic digester treating food waste: effect of trace elements on the digester recovery and stability [J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 477 – 485.

24 Guo J, Dong R, Clemens J, et al. Kinetics evaluation of a semi-continuously fed anaerobic digester treating pig manure at two mesophilic temperatures [J]. *Water Research*, 2013, 47(15): 5743 – 5750.

25 Chen S, Sun D, Chung J-S. Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic-aerobic moving-bed biofilm reactor system [J]. *Waste Management*, 2008, 28(2): 339 – 346.