

王艳芹, 付龙云, 杨 光, 等. 农村有机生活垃圾等混合物料厌氧发酵产沼气性能[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1173–1179.

WANG Yan-qin, FU Long-yun, YANG Guang, et al. Biogas production of rural organic wastes during anaerobic digestion[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1173–1179.

农村有机生活垃圾等混合物料厌氧发酵产沼气性能

王艳芹^{1,2}, 付龙云¹, 杨 光¹, 袁长波¹, 李明华³, 姚 利^{1,2*}

(1.山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 2.山东省农业面源污染防治重点实验室, 济南 250100; 3.华北油田供水供电中心供水运行工区, 河北 沧州 062552)

摘 要:为获得有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪混合物料厌氧发酵产沼气性能,为农村废弃物沼气工程高效运行提供依据,在初始总固体(TS)为12%和中温(35±1)℃条件下,考察了有机生活垃圾、玉米秸秆与牛粪三物料不同湿基质量比(1:0:2、1:0.5:1.5、1:1:1、1:1.5:0.5、1:2:0)对厌氧发酵过程的影响。结果表明:与双物料混合厌氧发酵相比,三物料混合厌氧消化能显著提高原料产气率,有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪配比为1:1:1的组合单位TS累积产气量高于其他处理;不同发酵物料配比能影响厌氧发酵完成时间,随着秸秆比例的增加,完成厌氧发酵的时间逐渐增长,有机生活垃圾和牛粪的组合与三者配比为1:0.5:1.5、1:1:1、1:1.5:0.5和1:2:0的处理相比,厌氧发酵完成时间分别缩短了12、15、19、22 d;三物料混合发酵适宜的配比能平衡发酵系统中酸的浓度,防止系统酸化,并能提高纤维素半纤维素降解率。综上认为三物料最佳配比为1:1:1。

关键词:厌氧消化;沼气;农村有机生活垃圾;玉米秸秆;牛粪

中图分类号:X705 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)06-1173-07 doi:10.11654/jaes.2016.06.021

Biogas production of rural organic wastes during anaerobic digestion

WANG Yan-qin^{1,2}, FU Long-yun¹, YANG Guang¹, YUAN Chang-bo¹, LI Ming-hua³, YAO Li^{1,2*}

(1.Institute of Agricultural Resource and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100; 2.Shandong Provincial Key Laboratory of Agricultural Non-Point Source Pollution Control and Prevention, Jinan 250100; 3.Water Supply Operation Area of Water and Power Supply Center, Huabei Oilfield Company, Cangzhou 062552, China)

Abstract: Nowadays huge amount of organic wastes has been generated in rural area. Recycling these organic wastes is an interesting research topic. Here an experiment was conducted to produce biogas from rural domestic organic wastes by anaerobic digestion. Domestic organic wastes were anaerobically co-digested with corn stover and cow manure at different ratios (1:0:2, 1:0.5:1.5, 1:1:1, 1:1.5:0.5, and 1:2:0, by wet weight ratio) under mesophilic condition (35±1) °C and total solid (TS) content of 12%. Biogas production was much higher from three feedstocks than from two feedstocks. The highest biogas yield (278.92 mL·g⁻¹) was obtained with 1:1:1 mixture. The digestion time was also influenced by the ratios of feedstocks. Increasing proportions of corn stover and cow manure extended the fermentation time. The fermentation time of mixture (1:0:2) was respectively 12, 15, 19, and 22 day shorter than that of mixtures 1:0.5:1.5, 1:1.5:0.5, and 1:2:0. The degradation of cellulose and hemicellulose was improved in the mixture systems. In conclusion, the optimal mixing ratio was 1:1:1. Our results would shed light on the operation of rural organic waste biogas project.

Keywords: anaerobic digestion; biogas; rural organic domestic waste; corn stover; cow manure

收稿日期:2015-11-10

基金项目: 国家科技支撑项目(2013BAJ10B11-04); 山东省科技发展计划项目(2014GSF117012); 山东省集约蔬菜区有机废弃物沼气利用技术研究与示范; “海外泰山学者”建设工程专项

作者简介: 王艳芹(1978—), 女, 山东潍坊人, 副研究员, 硕士, 主要从事农业废弃物资源化利用技术研究。E-mail: wangyanqin2003@126.com

* 通信作者: 姚 利 E-mail: nkyyaoli@163.com

据统计,全国每年产生农作物秸秆超过7亿多^[1],其中玉米秸秆约有2.16亿t,而且超过一半的玉米秸秆没有被利用^[2-3]。全国每年产生畜禽粪便约30亿t^[4-5]。玉米秸秆、粪便等不合理处理不仅造成很大的资源浪费,还会污染环境。近几年随着农村经济的发展,农村生活垃圾产生量也与日俱增。据统计,全国农村每年生活垃圾产生量约3亿t^[6],约为城市垃圾产生量的75%,但只有很少的生活垃圾得到处理,处理的方式也仅限于转运、填埋。当前我国农村能源消费结构不合理,农村居民生活用能仍以秸秆、薪柴为主,二者分别占到农村居民生活用能的51.46%和28.02%^[7]。秸秆不合理利用,降低了其热值,影响了农村空气质量。如何合理高效地处理这些废弃物,解决农村用能,是一个亟待解决的问题。

厌氧发酵因在处理废弃物的同时能产生热、电及燃料而备受人们关注^[8]。目前,通过厌氧发酵生产沼气以提高秸秆、粪便利用率的方法在一些地区已得到普遍应用^[9],但多为单一物料发酵。为了提高物料发酵效率,近几年混合物料厌氧发酵成为国内外大量学者研究的热点之一^[10]。Ye等^[11]研究了稻秆与鸡粪、猪粪混合物料厌氧发酵,发现鸡粪、猪粪和稻秆混合物料厌氧发酵最佳配比为0.4:1.6:1,沼气产量达到674.4 L·kg⁻¹VS(挥发固体),比单独稻秆和猪粪发酵分别提高71.67%和10.41%。Zhou等^[12]研究了玉米秸秆和牛粪混合物料厌氧发酵对提高沼气产量的影响,发现玉米秸秆和牛粪混合发酵沼气产量比单一牛粪或单一玉米秸秆都有很大程度提高。李东等^[13]研究了稻草与鸡粪配比对混合厌氧消化产气率的影响,发现与稻草和鸡粪单独厌氧消化相比,混合厌氧消化能够显著提高原料产气率,稻草与鸡粪VS比为1:1时,挥发性固体产气率能达到446 mL·g⁻¹。

本研究开展了农村有机生活垃圾、玉米秸秆与牛粪联合厌氧发酵试验,考查了混合物料厌氧消化对产气效果的影响,以为农村多种废弃物集中处理提供有效的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验概况

在山东省选取15个村庄和8个奶牛养殖场,对农村有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪各10个样品的总固体(TS)含量进行了测定,结果见表1。

1.2 试验材料

试验原料为农村有机生活垃圾、玉米秸秆和奶牛

表1 原料调研情况

Table 1 General characteristics of feedstocks studied

参数	有机生活垃圾	玉米秸秆	奶牛粪便
总固体(TS)/%	9.22~10.69	90.27~93.58	20.74~23.89
变异系数/%	5.26	1.21	4.75

粪便,理化性质如表2所示。

有机生活垃圾取自山东省章丘市普集镇乐家村分类后的有机生活垃圾,主要包括蔬果废弃物和极少量的剩饭剩菜等,用粉碎机打碎。奶牛新鲜粪便取自山东农科院畜牧所奶牛场。玉米秸秆取自山东省章丘市普集镇,切碎后自然风干,用粉碎机粉碎至3~5 mm。接种物取自山东省淄川区法家村正常运行沼气工程沼渣,该工程原料为秸秆和牛粪。

1.3 试验设置

试验共设5个处理,有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪的湿基质量比分别为1:0:2、1:0.5:1.5、1:1:1、1:1.5:0.5、1:2:0,另设置对照组CK(只以接种物为原料)。每个处理均进行3个平行试验。设计接种率为41%(以接种污泥TS占发酵原料TS的百分数计),通过加入不同量的自来水调节各处理发酵浓度为12%。添加物料后,向发酵瓶中吹氮气1 min,以保证严格的厌氧环境。试验期间,每天上午9:00测定沼气产量,每2~4 d测定沼气成分,每3~8 d取样测定pH值和挥发性脂肪酸,测定厌氧发酵前后各处理纤维素、半纤维素的值。试验装置如图1所示。

1.4 指标测定方法

TS、VS采用烘干失重方法测定^[14];pH值采用pH

表2 厌氧消化原料的基本特性

Table 2 Characteristics of feedstocks used for anaerobic digestion

参数	有机生活垃圾	玉米秸秆	奶牛粪便	接种物
总固体(TS)/%	10.69±0.33	92.14±0.07	23.72±0.13	28.20±0.10
挥发固体(VS)/%	8.29±0.02	82.62±0.04	18.89±0.01	13.08±0.03
pH	6.2±0.01	—	8.1±0.17	8.0±0.37
总碳(TC)/%	38.47±0.36	47.30±0.12	42.70±0.29	27.01±0.03
总氮(TN)/%	1.85±0.06	0.91±0.08	2.17±0.38	1.41±0.29
C/N	20.79±0.89	51.98±0.09	19.68±0.06	19.16±0.17
总凯氏氮(TKN)/%	1.74±0.04	0.89±0.11	2.01±0.08	1.39±0.66
纤维素/%	10.39±0.45	23.75±0.02	23.68±0.05	16.54±0.02
半纤维素/%	14.23±0.22	27.56±0.04	26.43±0.52	1.94±0.09
木质素/%	10.11±0.23	20.36±0.93	8.06±0.03	10.55±0.25
蛋白质/%	10.88±0.11	5.56±0.51	12.56±0.01	8.69±0.05
脂肪/%	25.22±0.08	—	—	—

注:表中数据为3次重复的平均值。

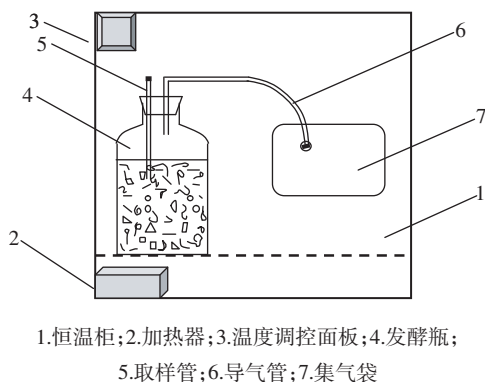


图1 试验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of experimental device

计(上海 Bante220)测定;沼气产量通过沼气流量计(德国 Ritter, TG05-5)测定;气体成分采用气相色谱法测定(普析 GC1100);挥发性脂肪酸浓度采用气相色谱法测定(岛津 GC-2014);纤维素、半纤维素用木质纤维素测定仪测定(丹麦 FOSS Fibertec2010);总有机碳(TOC)用 TOC 测定仪(德国耶拿, multi N/C 3100)测定;总凯氏氮(TKN)用凯氏定氮仪(瑞士 BUCHI, Kje Master k-375)测定。

2 结果与讨论

2.1 产气情况的变化

如图 2a 所示,有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪三物料混合厌氧发酵日产气量较稳定,三者组合可以促进厌氧消化的平衡。在有机生活垃圾投加比例不变的情况下,随着秸秆比例的增加,产气高峰值出现时间推迟 2~3 d,表明玉米秸秆未预处理直接进行厌氧发酵,产气较慢,玉米秸秆比例高,产气峰值出现时间晚。仅有机生活垃圾和牛粪混合发酵,日产气量较低,产气持续时间较其他处理缩短近 30 d,产气高峰值出现时间比三物料混合的处理提前 3~8 d。这表明仅有机生活垃圾和牛粪混合发酵时产气速率快,因为二者都为易降解物料。有机生活垃圾和玉米秸秆混合发酵,产气高峰期出现 2 次,日产气量也较低,表明有机生活垃圾和玉米秸秆发酵过程中相互影响不大。

一般认为,产气量达到总产气量的 90%以上即可认为发酵基本完成^[15-16]。有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪三者比例为 1:0.2、1:0.5:1.5、1:1:1、1:1.5:0.5 和 1:2:0 的组合完成厌氧发酵的时间分别为 23、35、38、42、45 d,表明在有机生活垃圾投加量不变的情况下,随着秸秆比例的增加,完成厌氧发酵的时间逐渐增长。本实验获得的完成厌氧发酵时间高于任海伟等^[17]研究的

风干秸秆与牛粪混合物料厌氧发酵完成时间。分析原因是本实验的配比为鲜重配比,若以 TS 计,各处理玉米秸秆比例偏高,未预处理的玉米秸秆延长了厌氧发酵完成时间。因其中有机生活垃圾易降解,对厌氧发酵完成时间影响较小。

从图 2b 来看,各处理甲烷浓度(体积分数)变化趋势基本一致且相差不大,在厌氧消化第 6 d 以后,基本稳定在 55%~65%之间。图 2c 为单位 TS 累积产气量的变化,在有机生活垃圾投加比例为 1 的情况下,玉米秸秆和牛粪配比为 0:2、0.5:1.5、1:1、1.5:0.5 和 2:0 的组合单位 TS 累积产气量分别为 142.16、269.19、278.92、190.81、130.81 mL·g⁻¹。二者配比为 0.5:1.5 和 1:1 的组合单位 TS 累积产气量明显高于其他组合,与陈广银等^[18]获得的牛粪所占比例太低会影响产气的结果基本相符。结果表明对有机生活垃圾来说,三物料混合发酵优于双物料混合发酵,三物料的最佳配比为 1:1:1,该配比单位 TS 累积产气量比有机生活垃圾与牛粪混合发酵、有机生活垃圾与秸秆混合发酵分别提高 96.2%和 113.2%。

2.2 液相成分的变化

多项研究表明,pH 值在 7 左右时产甲烷菌比较活跃^[19-20]。本试验各处理 pH 值变化如图 3a 所示。有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪配比为 1:0.5:1.5、1:1:1 和 1:1.5:0.5 的处理 pH 值先降低、后升高,然后趋于稳定,稳定值基本维持在 7 左右。这与 Lin 等^[21]的研究类似,表明三物料混合发酵能互相促进,平衡 pH 值。有机生活垃圾和牛粪混合发酵,从发酵开始到第 6 d,pH 值一直下降至 4.7 左右,处于严重酸化状态。这是因为有机生活垃圾自然酸化速度很快,牛粪也属于易发酵物质,二者混合发酵能延后酸化时间。有机生活垃圾和秸秆混合发酵,从发酵开始到第 6 d,pH 值也一直下降,到第 16 d 开始回升,第 23 d 以后处于 7 左右的稳定状态。表明添加玉米秸秆有助于有机生活垃圾酸化过程的恢复。

乙酸、丙酸、丁酸是厌氧发酵过程中挥发性脂肪酸的主要组成部分,各种酸的积累与消耗是厌氧反应进程指示性参数^[22]。从图 3 可以看出,五个不同处理中乙酸、丙酸和丁酸的浓度都呈现先增加后降低的趋势。这是因为水解产酸菌的生长和产酸速率较快,而产甲烷菌的生长和产甲烷速率较慢。由图 3b 可以看出,有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪配比为 1:0.5:1.5 和 1:1:1 的处理乙酸浓度在厌氧发酵的 0~5 d 内逐渐升高,在第 5 d 分别达到峰值 1245、1338 mg·L⁻¹,然后

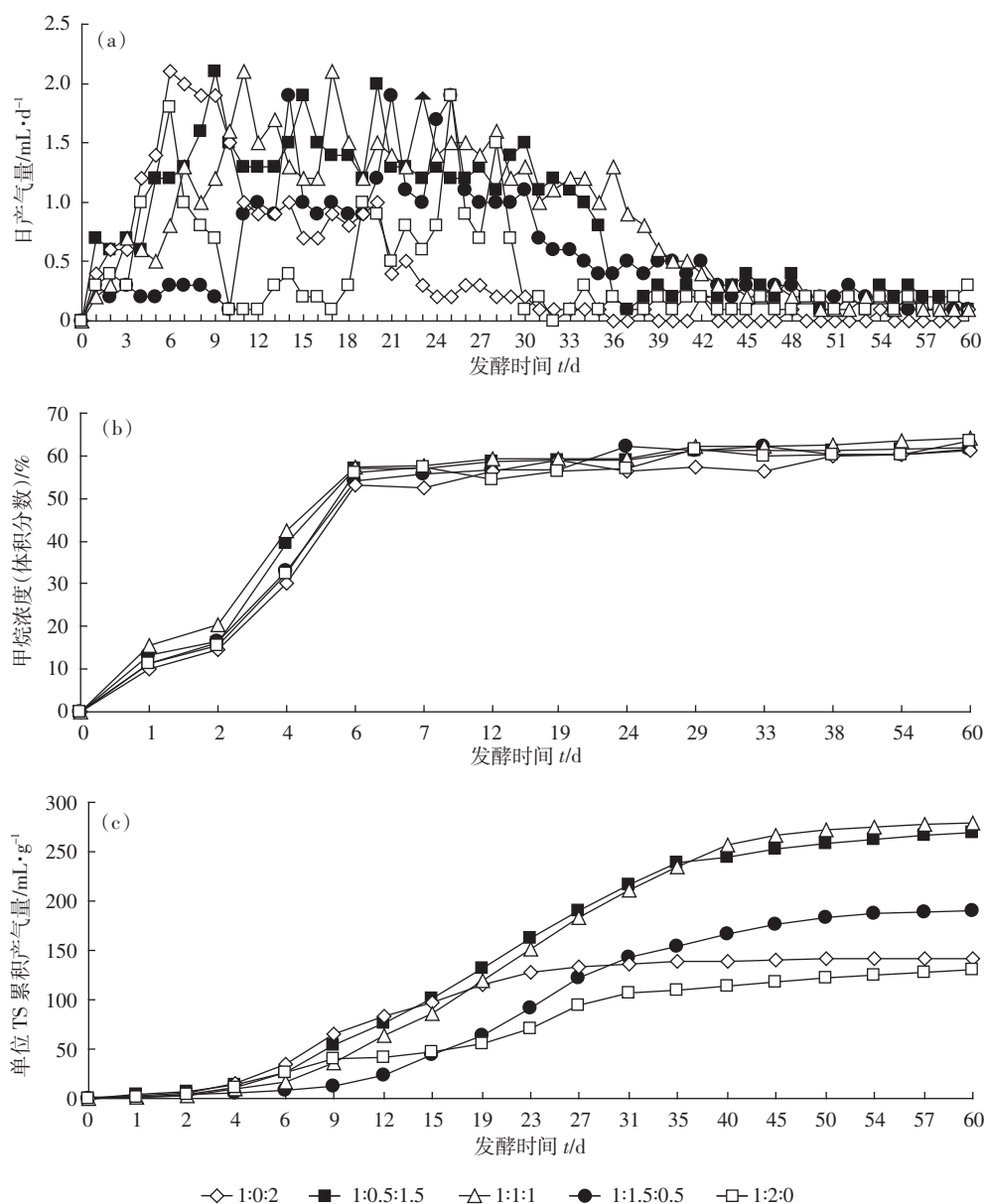


图2 有机垃圾、秸秆、牛粪不同比例下厌氧消化产气速率、甲烷浓度和单位 TS 累积产气量

Figure 2 Biogas production rate, methane concentration and unit TS cumulative biogas production of organic domestic wastes, corn straw and cow manure mixture

缓慢下降, 到第 35 d 降到 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。配比为 1:1.5:0.5 的处理, 乙酸浓度在厌氧发酵的 0~9 d 内逐渐升高, 在第 9 d 达到峰值 $925 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后缓慢下降, 但下降速度较前两者慢。这表明三物料混合发酵系统更稳定, 没有出现酸化现象。有机生活垃圾和牛粪混合发酵, 在厌氧发酵的第 3 d 乙酸浓度达到最大值 $1876 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 然后在 $1200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右波动, 处于酸化状态。这与刘荣厚等^[23]和李秀辰等^[24]的研究类似。有机生活垃圾、蔬菜废弃物和浒苔都属于易降解物质, 本研究加入的牛粪延后了酸化时间。有机生活垃圾和秸秆

混合发酵, 乙酸共出现 2 个峰值, 分别为第 3 d 的 $1185 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和第 12 d 的 $1067 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与 pH 值的变化有很好的吻合性。

Griffin 等^[25]研究表明, 丙酸是降解最慢且对环境变化最敏感的酸, 能对厌氧发酵产生抑制。产甲烷菌对丙酸的耐受浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26]。从图 3c 可以看出, 各处理都没有出现丙酸抑制。分析日产气率发现, 除有机生活垃圾和牛粪混合发酵的处理, 其他处理产气高峰期出现较晚, 因为丙酸降解较慢, 延长了产气时间。三物料混合发酵及有机生活垃圾与秸秆混合发

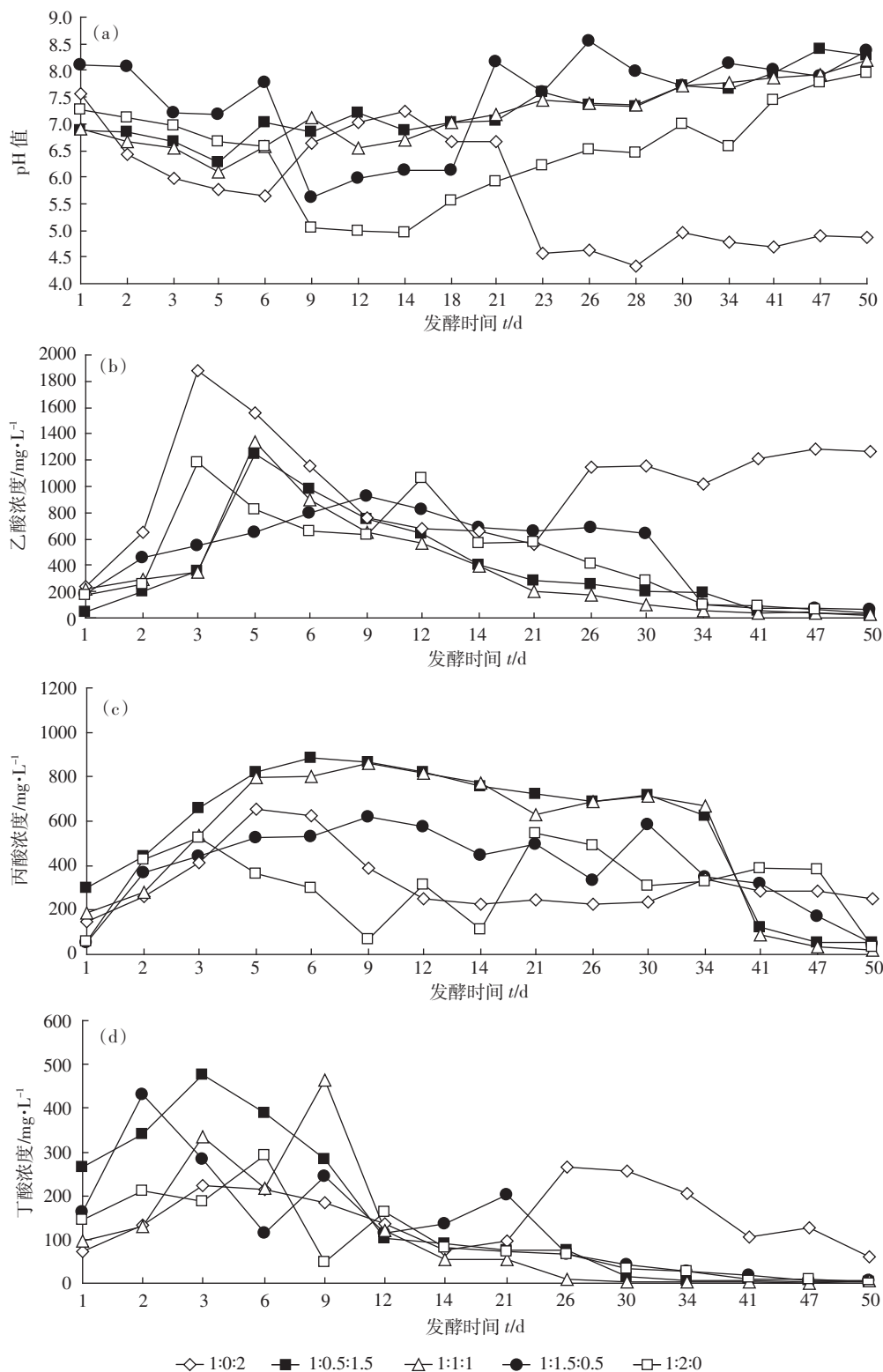


图3 厌氧消化过程中 pH 值及挥发性脂肪酸浓度变化图

Figure 3 Changes of pH and volatile fatty acid content during anaerobic digestion

酵过程中,丁酸变化趋势基本一致,发酵 30 d 后丁酸浓度基本测不出。而有机生活垃圾与牛粪混合发酵时,后续丁酸浓度一直很高,表明发酵后期出现了酸

抑制,与乙酸分析结果一致。

2.3 纤维素、半纤维素降解率的变化

有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪不同配比混合发

酵前后中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、纤维素和半纤维素的变化如图4所示。可以看出,配比为1:1:1的处理纤维素降解率最高,达到53.92%,然后依次是配比1:2:0、1:0.5:1.5、1:1.5:0.5和1:0:2的处理。配比为1:2:0的处理产气量较低而纤维素降解率较高,表明牛粪的添加会提高秸秆纤维素降解率。半纤维素的降解率从大到小依次为配比1:0.5:1.5、1:1:1、1:1.5:0.5、1:2:0和1:0:2的处理,与产气量规律基本一致。本文的纤维素、半纤维素降解率低于陈甲等^[27]的研究,原因可能是本研究为混合物料,且没有搅拌等因素影响所致。

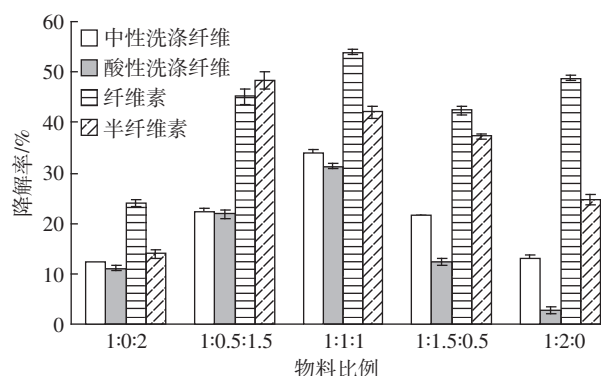


图4 中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、纤维素和半纤维素的降解率
Figure 4 Degradation of NDF, ADF, cellulose and hemicelluloses

3 结论

(1)合适的物料配比能改善底物的厌氧发酵性能,并促进日产气量及单位TS累积产气量。有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪配比1:1:1时累积TS产气率最高,达到278.92 mL·g⁻¹。

(2)不同的发酵物料配比能影响厌氧发酵速率,改变厌氧发酵完成时间。有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪混合厌氧发酵,在有机生活垃圾投加比例不变的情况下,完成厌氧发酵的时间随着秸秆比例的增加逐渐增长。

(3)酸化会降低产甲烷菌的活性,进而抑制厌氧发酵过程的进行。当有机生活垃圾和牛粪双物料混合发酵时,系统会发生酸化,添加秸秆会改善系统性能,且有助于提高纤维素、半纤维素降解率。

(4)有机生活垃圾、玉米秸秆和牛粪混合厌氧发酵,在发酵浓度为12%的情况下,三物料产气性能优于双物料,最佳物料配比为1:1:1。

参考文献:

[1] 朱德文, 曹成茂, 陈永生, 等. 秸秆厌氧干发酵产沼气关键技术及问

题探讨[J]. 中国农机化, 2011(4):56-59.

ZHU De-wen, CAO Cheng-mao, CHEN Yong-sheng, et al. Key technologies and discussion of the straw dry-anaerobic fermentation[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2011(4):56-59.

[2] Fu S F, Wang F, Yuan X Z, et al. The thermophilic(55 °C) microaerobic pretreatment of corn straw for anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175(5):203-208.

[3] 李 轶, 刘雨秋, 张 镇, 等. 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产沼气工艺优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5):185-192.

LI Yi, LIU Yu-qiu, ZHANG Zhen, et al. Optimization of anaerobic fermentation with mixed materials of corn straw and pig manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5):185-192.

[4] 张 田, 卜美东, 耿 维, 等. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5):1241-1249.

ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei, et al. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5):1241-1249.

[5] 罗 娟, 董保成, 陈 玲, 等. 畜禽粪便与玉米秸秆厌氧消化的产气特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10):219-224.

LUO Juan, DONG Bao-cheng, CHEN Ling, et al. Experiments on aerogenesis characteristics of anaerobic digestion of animal manure and corn straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(10):219-224.

[6] 普锦成, 袁 进, 李晓姣, 等. 我国农村生活垃圾污染现状与治理对策[J]. 现代农业科技, 2012(4):283-285.

PU Jin-cheng, YUAN Jin, LI Xiao-jiao, et al. The status and prevention countermeasures of rural domestic garbage pollution in China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012(4):283-285.

[7] 中国第二次全国农业普查资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.

The second national agricultural census data assembly in China[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009.

[8] Ge X M, Matsumoto T, Keith L, et al. Biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169(5):38-44.

[9] Zhang T, Mao C L, Zhai N N, et al. Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk[J]. *Waste Management*, 2015, 35:119-126.

[10] Wang X J, Yang G H, Feng Y Z, et al. Potential for biogas production from anaerobic co-digestion of dairy and chicken manure with corn stalks[J]. *Advanced Materials and Technologies*, 2012, 347:2484-2492.

[11] Ye J Q, Li D, Sun Y M, et al. Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure[J]. *Waste Management*, 2013, 33(12):2653-2658.

[12] Zhou S X, Zhang Y L, Dong Y P, et al. Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of mixed corn stover and cow dung[J]. *Energy*, 2012, 46:644-648.

[13] 李 东, 叶景清, 甄 峰, 等. 稻草与鸡粪配比对混合厌氧消化产气率的影响[J]. 农业工程学报. 2013, 29(2):232-238.

LI Dong, YE Jing-qing, ZHEN Feng, et al. Effects of anaerobic co-di-

- gestion of different proportions between rice straw and chicken manure on biogas yield rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(2):232-238.
- [14] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1998.
HE Yan-ling. Anaerobic biological treatment of wastewater[M]. Beijing: Chinese light Industry Press, 1998.
- [15] 康佳丽. 稻草中温高效厌氧消化生产生物气的实验研究[D]. 北京:北京化工大学, 2007.
KANG Jia-li. High-efficiency biogasification of rice straw by anaerobic digestion[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2007.
- [16] Zhong W Z, Zhang Z Z, Luo Y J, et al. Effect of biological pretreatment in enhancing corn straw biogas production[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(24):11177-11182.
- [17] 任海伟, 姚兴泉, 李金平, 等. 玉米秸秆储存方式对其与牛粪混合厌氧消化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18):213-222.
REN Hai-wei, YAO Xing-quan, LI Jin-ping, et al. Effect of maize straw storage practice on biogas production performance during anaerobic co-digestion with cattle manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(18):213-222.
- [18] 陈广银, 郑正, 邹星星, 等. 牛粪与互花米草混合厌氧消化产沼气的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3):179-183.
CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, ZOU Xing-xing, et al. Experiment on producing biogas by anaerobic co-digestion of cow feces and *Spartina alterniflora*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(3):17179-183.
- [19] Park S, Li Y. Evaluation of methane production and macronutrient degradation in the anaerobic co-digestion of algae biomass residue and lipid waste[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 111(5):42-48.
- [20] Wang F, Hidaka T, Tsuno H, et al. Co-digestion of polylactide and kitchen garbage in hyperthermophilic and thermophilic continuous anaerobic process[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112:67-74.
- [21] Lin L, Yang L C, Li Y B, et al. Effect of feedstock components on thermophilic solid-state anaerobic digestion of yard trimmings[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29:3699-3706.
- [22] Xie S, Lawlor P G, Frost J, et al. Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10):5728-5733.
- [23] 刘荣厚, 王远远, 孙辰, 等. 蔬菜废弃物厌氧发酵制取沼气的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4):209-213.
LIU Rong-hou, WANG Yuan-yuan, SUN Chen, et al. Experimental study on biogas production from vegetable waste by anaerobic fermentation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4):209-213.
- [24] 李秀辰, 张国琛, 孙文, 等. 不同预处理和发酵条件对苜蓿沼气产率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19):200-206.
LI Xiu-chen, ZHANG Guo-chen, SUN Wen, et al. Biogas yield of enteromorpha under different pretreatment and anaerobic fermentation conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(19):200-206.
- [25] Griffin M E, McMahon K D, Mackie R I, et al. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolid[J]. *Biotechnology Bioengineering*, 1998, 57(3):342-355.
- [26] Lin J, Zuo J E, Gan L L. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(8):1403-1408.
- [27] 陈甲甲, 李秀金, 刘研萍, 等. 搅拌转速对稻草厌氧消化性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):144-148.
CHEN Jia-jia, LI Xiu-jin, LIU Yan-ping, et al. Effect of mixing rates on anaerobic digestion performance of rice straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):144-148.