

齐利格娃, 张克强, 田雪力, 等. 羊粪与尾菜配比对高固体厌氧消化性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2475–2482.

QI Li-ge-wa, ZHANG Ke-qing, TIAN Xue-li, et al. Effect of mass ratio between sheep manure and vegetable residues on high-solid anaerobic co-digestion [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2475–2482.

羊粪与尾菜配比对高固体厌氧消化性能的影响

齐利格娃¹, 张克强^{1,2}, 田雪力¹, 翟中葳^{1,2}, 杜连柱^{1,2}, 丁飞飞¹, 梁军锋^{1,2*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部大理农业环境科学观测实验站, 云南 大理 671004)

摘要:为考察羊粪与尾菜联合高固体厌氧消化性能, 采用批式试验, 在初始有机负荷为 $45 \text{ gVS} \cdot \text{L}^{-1}$ 和中温 (37°C) 的条件下研究羊粪与尾菜不同挥发性固体 (VS) 质量配比 (1:0、3:1、2:1、1:1、1:2、1:3、0:1) 对厌氧消化性能的影响。结果表明: 羊粪与尾菜在 3:1、2:1、1:1、1:2、1:3 的不同配比处理条件下累积 VS 甲烷产率分别为 181.6、158.7、194.2、184.6、197.2 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$, 与羊粪单独发酵处理相比, 甲烷产率提高 7.3%~33.3%, 与尾菜单独发酵处理相比, 厌氧消化迟滞期 (λ) 与达到最大 VS 累积甲烷产量 90% 所需的时间 (T_{90}) 分别缩短 3.2~5.8 d 与 2.8~5.4 d。联合厌氧消化协同效应分析表明, 除 2:1 处理外, 羊粪与尾菜不同配比联合高固体厌氧发酵均存在协同作用。在中温高固体厌氧消化工程应用中, 建议羊粪与尾菜 VS 配比为 1:1, 设计水力停留时间为 20 d, 累积 VS 甲烷产率为 $194.2 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$ 。

关键词: 羊粪; 尾菜; 联合厌氧发酵; 高固体; 甲烷

中图分类号: X71 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)11-2475-08 doi:10.11654/jaes.2018-0223

Effect of mass ratio between sheep manure and vegetable residues on high-solid anaerobic co-digestion

QI Li-ge-wa¹, ZHANG Ke-qing^{1,2}, TIAN Xue-li¹, ZHAI Zhong-wei^{1,2}, DU Lian-zhu^{1,2}, DING Fei-fei¹, LIANG Jun-feng^{1,2*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Dali, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China)

Abstract: In order to investigate the effect of the mass ratio of sheep manure to vegetable residues on anaerobic digestion, high-solid anaerobic batch co-digestion of sheep manure and vegetable residues at 1:0, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, and 0:1 ratios was carried out at 37°C with initial organic loading of $45 \text{ gVS} \cdot \text{L}^{-1}$. The results showed that the cumulative methane yields based on volatile solids of sheep manure and vegetable residues at 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, and 1:3 ratios were 181.6, 158.7, 194.2, 184.6, and 197.2 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$, respectively, which increased by 7.3%~33.3% compared to that with only sheep manure as the substrate. Compared with only vegetable residues as the substrate, the lag periods of anaerobic digestion (λ) and the time to achieve 90% of the maximum cumulative methane yield (T_{90}) were shortened by 3.2~5.8 d and 2.8~5.4 d, respectively. Synergistic effect analysis of the anaerobic co-digestion showed that synergistic effects existed between anaerobic co-digestion of sheep manure and vegetable residues at the different mass ratios, except for 2:1. For practical project application, a 1:1 substrate mixture of sheep manure to vegetable residues was recommended, as the designed retention time and cumulative methane yield based on volatile solids were 20 d and $194.2 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$, respectively.

Keywords: sheep manure; vegetable residues; anaerobic co-digestion; high solids; methane

收稿日期: 2018-02-13 录用日期: 2018-04-27

作者简介: 齐利格娃 (1993—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 从事农业废弃物资源化利用的研究。E-mail: qlgw9346@163.com

*通信作者: 梁军锋 E-mail: liangjunfeng2008@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800801-02); 中国农业科学院科技创新工程协同创新项目 (CAAS-XTCX2016011-02)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0800801-02); Synergistic Agricultural Science and Technology Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-XTCX2016011-02)

近年来,随着集约化、规模化农业的快速发展,我国农业废弃物的产量与日俱增。据报道,我国每年羊粪与尾菜产量分别高达4千万t^[1]与1亿t^[2]。这些农业废弃物多数未得到有效处理而直接排放到环境中,成为影响土壤、水体等环境的污染源。如何解决畜禽粪便、尾菜等农业废弃物对环境的污染问题已经成为众多学者研究的热点。

在各种农业废弃物的处理方式中,厌氧消化技术是高效的处理方法之一,已在猪粪、鸡粪、牛粪、秸秆等农业废弃物的处理中得到广泛应用^[3-5]。但是,已有大量研究发现运用单一原料进行厌氧发酵的厌氧消化效率不高,而多种原料联合进行厌氧共发酵可显著提高厌氧消化效果^[6-8]。张洪宾等^[9]研究表明,将牛粪与小麦秸秆进行联合厌氧发酵,其产气量显著高于牛粪与秸秆单独厌氧发酵,其中牛粪与小麦秸秆配比为1:1时的产气量比牛粪单独发酵提高11.5%。Lehtomäki等^[5]将牛粪与不同作物秸秆进行联合发酵,可以使纯牛粪的单位容积甲烷产量提高16%~65%。目前,已有少量关于羊粪与农作物秸秆^[10]、城市有机垃圾^[11]、猪粪^[12]等废弃物联合共发酵提高厌氧发酵效率的报道,但尚未见羊粪与尾菜联合厌氧消化方面的研究报道。

因此,本试验以羊粪与尾菜作为发酵原料,在初始有机负荷为45 g VS·L⁻¹、中温(37±1℃)条件下进行高固体联合厌氧发酵,研究羊粪与尾菜对比对厌氧消化性能的影响,通过对不同原料配比的累积挥发性固体(VS)甲烷产率及修正的Gompertz动力学模型模拟产气过程,确定较优的原料配比,以期为羊粪与尾菜高固体联合厌氧发酵在工程上的应用提供理论与技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

羊粪取自甘肃某规模化舍饲肉养殖场,剔除大块石子等杂物后置于4℃冰箱中备用。尾菜取自甘肃某蔬菜种植合作社,为娃娃菜收割后的尾菜,经破碎均质后置于4℃冰箱中备用。接种物取自天津某运行良好的污水处理厂厌氧消化阶段的厌氧活性污泥。发酵原料和接种物的基本理化特性与有机组分含量分别如表1、图1所示。

1.2 试验设计

试验采用测压法进行厌氧批式试验。具体方法如下:采用有效容积为619 mL的厌氧瓶作为厌氧发

表1 发酵原料及接种物的基本理化性质

Table 1 Basic characteristics of substrates and inoculums

指标	TS/%	VS/TS	TOC/%	TN/%	C/N	pH
羊粪	64.8	52.4	24.6	1.3	19.2	8.0
尾菜	8.9	79.5	37.4	3.2	11.6	4.0
接种物	8.5	46.8	22.0	4.8	4.6	7.8

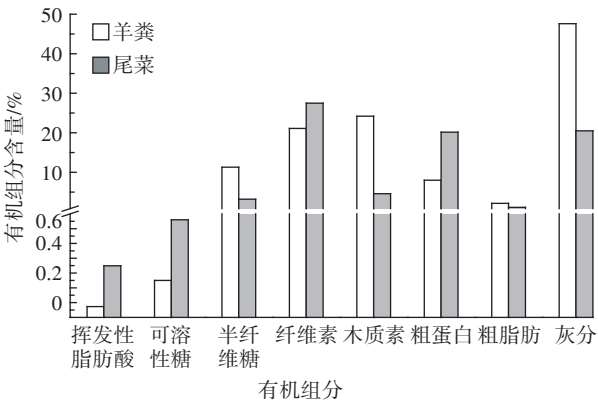


图1 羊粪与尾菜的有机组分含量

Figure 1 Organic composition of sheep manure and vegetable residues

酵装置(图2)。设置初始发酵体系的有机负荷为45 g VS·L⁻¹,试验共设置7个处理(表2),分别为羊粪与尾菜挥发性固体(VS)质量比1:0、3:1、2:1、1:1、1:2、1:3、0:1,每处理重复3次。试验中接种物与底物的添加比设置为1.25:1(VS质量比),用自来水补齐发酵体系的总质量至200 g,剩余顶空体积用于收集沼气^[13]。发酵原料添加完毕后,向厌氧发酵瓶中冲入氮气,持续2 min,以排尽厌氧瓶顶部空间中的空气,保持发酵体系的厌氧环境。然后在厌氧瓶顶部塞上丁基橡胶塞,并加盖拧紧。将各厌氧瓶于37±1℃的恒温培养箱中避光培养,每日用手摇晃2次,使发酵体

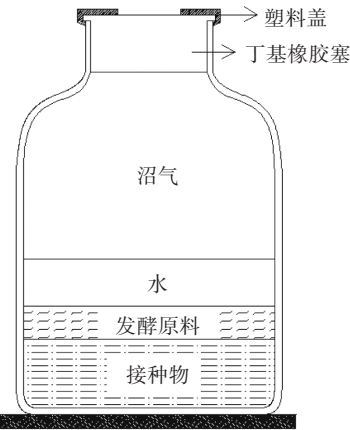


图2 厌氧试验装置

Figure 2 Anaerobic experimental setup

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

试验组	TS/%	初始有机负荷/g VS·L ⁻¹
1:0	9.2	45
3:1	8.8	45
2:1	8.7	45
1:1	8.5	45
1:2	8.3	45
1:3	8.2	45
0:1	7.9	45

系均匀。每日定期使用精密微量气体压力测定仪(GWH3111,德国)测定各厌氧瓶中的气体压力,并用气体状态方程将气体压力转化为气体体积。定期用注射器采集厌氧瓶顶部的气体样品,用于测定沼气组分含量。

1.3 测定项目与方法

总固体含量(TS)、VS含量采用重量法测定^[14]。总有机碳(TOC)由VS乘以0.47计算得到^[15]。总氮(TN)采用凯氏定氮法测定,粗蛋白含量由凯氏氮乘以6.25计算得到^[16]。根据吴晓杰^[17]方法测定羊粪、尾菜和接种物的纤维素、半纤维素与木质素含量。可溶性糖采用蒽酮-硫酸法测定^[18]。粗脂肪根据GB/T 5009.6—2003中酸水解法测定。

沼气组分含量通过气相色谱仪测定(Trace1300, Thermo, 美国),色谱柱采用2 m×φ3 mm的Porapak Q柱,检测器为热导检测器(TCD),采用高纯氮气作为载气,测定条件为:载气流速8 mL·min⁻¹,柱温40℃,检测器温度200℃,进样口温度120℃^[19]。

挥发性脂肪酸(VFAs)通过气相色谱法测定^[20],色谱柱为30 m×0.35 mm×1 μm的毛细管柱;进样口温度为200℃,检测器温度为220℃,载气流速8 mL·

min⁻¹。根据胡荣笃^[21]的计算方法,将发酵液中各种脂肪酸的浓度换算成乙酸的浓度来计算分析。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据利用Microsoft Excel 2007 进行处理,采用SPSS 软件进行方差统计分析和相关性分析。

试验动力学分析采用修正的 Gompertz 模型模拟发酵过程中累积VS甲烷产率,该模型可计算厌氧高固体发酵最终甲烷产量、最大产甲烷速率和迟滞期^[22-26]。模型方程见式(1):

$$M = P \times \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_m \times e}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中: M 为 t 时刻累积VS甲烷产率, mL·g⁻¹; P 为最终累积VS甲烷产率, mL·g⁻¹; R_m 为最大VS产甲烷速率, mL·g⁻¹·d⁻¹; λ 为迟滞期, d。

2 结果与讨论

2.1 羊粪与尾菜配比对产沼气性能的影响

羊粪与尾菜不同配比厌氧发酵的日产沼气产率见图3。由图3可知,羊粪单独厌氧处理(1:0)在发酵期间仅在第7 d出现一个产气高峰,日产沼量为99 mL。羊粪单独发酵处理产气启动相对滞后,产气状态不佳,这可能是由于羊粪的木质素含量很高,不易水解,使得纤维素、半纤维素没有被有效降解利用,产甲烷菌无法获得充足的代谢底物,影响其转化效率^[27]。羊粪与尾菜配比为3:1、2:1的处理,在发酵期间有两个产气高峰,第一个产气高峰均出现在第2 d,日产沼量分别为99、136 mL,第二个产气高峰分别出现在第7、8 d出现,日产沼量分别为128、157 mL。1:1、1:2、1:3处理在发酵期间有三个产气高峰,第一个产气高峰均在第2 d出现,日产沼量分别为142、136、151 mL,第二个产气高峰均在第8 d出现,日产沼

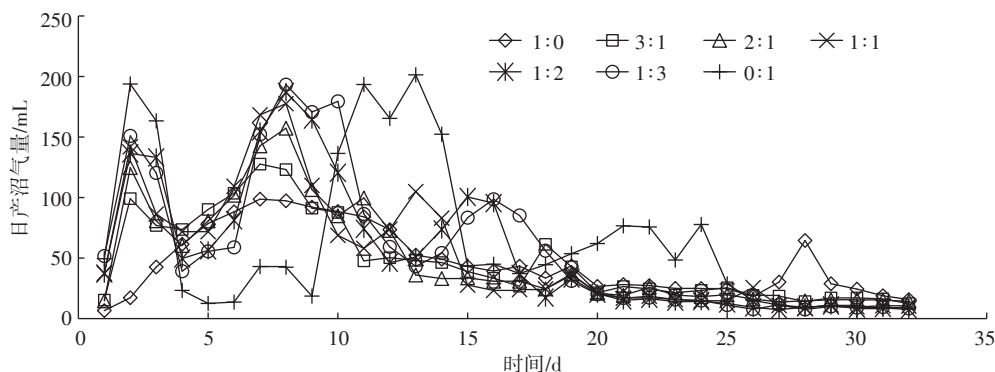


图3 各处理日产气量的变化

Figure 3 The change of daily biogas yield in each treatment

气量分别为178、187、193 mL,第三个产气高峰分别
在第13、15、16 d出现,日产沼气量分别为105、100、
99 mL。尾菜单独发酵处理(0:1)在发酵期间有两个
产气高峰,但第二个产气高峰与其他处理相比出现时
间较晚,这是由于尾菜纤维素、粗蛋白含量较高,易被
发酵型细菌水解,在发酵过程中出现了一定程度的挥
发性脂肪酸(VFAs)积累,抑制甲烷菌的生长^[28]。由此
可见,与羊粪或尾菜单独发酵相比,羊粪与尾菜联合
高固体厌氧发酵能够较大程度地提高生物降解能力
和沼气产量,这与韩文彪等^[11]对城市有机垃圾和羊粪
进行联合厌氧发酵的试验结果一致。

羊粪与尾菜不同配比厌氧发酵的累积VS甲烷产
率见图4和表3。由图4和表3可知,羊粪与尾菜联合
厌氧发酵可提高甲烷产率。当羊粪与尾菜联合厌氧
发酵时,在发酵的第12 d(厌氧发酵活跃期),各配比
(3:1、2:1、1:1、1:2、1:3)累积VS甲烷产率均显著高
于羊粪单独厌氧发酵处理和尾菜单独厌氧发酵处
理($P<0.05$),分别较羊粪和尾菜单独发酵处理提高
37.2%~69.7%和142.0%~199.4%。在发酵的第32 d

(厌氧发酵结束期),各配比(3:1、2:1、1:1、1:2、1:3)
的累积VS甲烷产率分别为181.6、158.7、194.2、184.6、
197.2 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$,均显著($P<0.05$)高于羊粪单独发酵
处理($147.9\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$),较该处理提高了7.3%~
33.3%;与尾菜单独发酵处理相比,羊粪与尾菜联合
发酵各处理的累积甲烷产率虽均较低,但羊粪与尾菜
1:1、1:3配比与尾菜单独发酵处理相近,方差分析结
果显示差异均不显著。由此可见,羊粪与纤维类原料
适宜的配比不仅可以提前产气高峰时间,还可以提高
甲烷产量、加快产气速率。张鸣等^[29]运用羊粪与麦秆
进行联合厌氧发酵,发现羊粪单独厌氧发酵最终累积
产气量为6 386.3 mL,而羊粪与麦秆联合发酵(C/N值
为25)最终累积产气量达到10 072.5 mL,这与本研究
的结果一致。

2.2 羊粪与尾菜配比对甲烷含量的影响

实验过程中各处理甲烷体积分数变化见图5。
如图5所示,发酵起始阶段主要是水解酸化阶段,0~5
d时,试验各处理 CH_4 浓度变化大致相似,主要呈逐渐
上升的趋势,发酵前期主要是上升阶段。随着发酵的

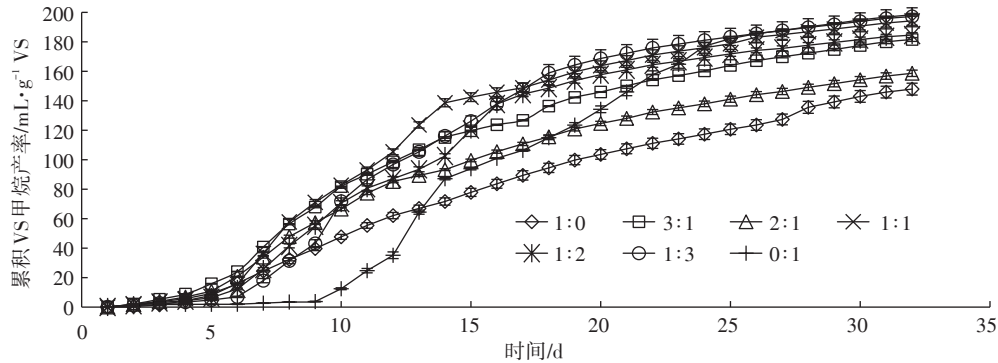


图4 各处理累积VS甲烷产率的变化

Figure 4 The change of cumulative methane yield in each treatment

表3 不同配比处理累积VS甲烷产率差异显著性分析($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$)

Table 3 Variance analysis of different proportions of cumulative methane yield($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{VS}$)

处理	时间/d			
	8	12	20	32
1:0	32.4±1.0d	62.1±2.1d	103.6±3.2f	147.9±4.02e
3:1	56.3±0.3a	98.6±0.4b	146.0±0.2c	181.6±1.3c
2:1	47.8±1.0b	85.2±0.8c	124.6±1.5e	158.7±2.2d
1:1	57.8±1.9a	105.4±1.9a	163.8±3.2ab	194.2±4.0ab
1:2	41.5±1.3c	87.1±1.4c	157.7±1.7b	184.6±1.7bc
1:3	31.4±1.9d	96.7±2.9b	168.7±5.9a	197.2±5.9a
0:1	3.4±0.2e	35.2±2.2e	134.2±2.3d	198.4±1.0a

注: 同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The different lowercase letters in the same column mean significant difference between different treatments ($P<0.05$).

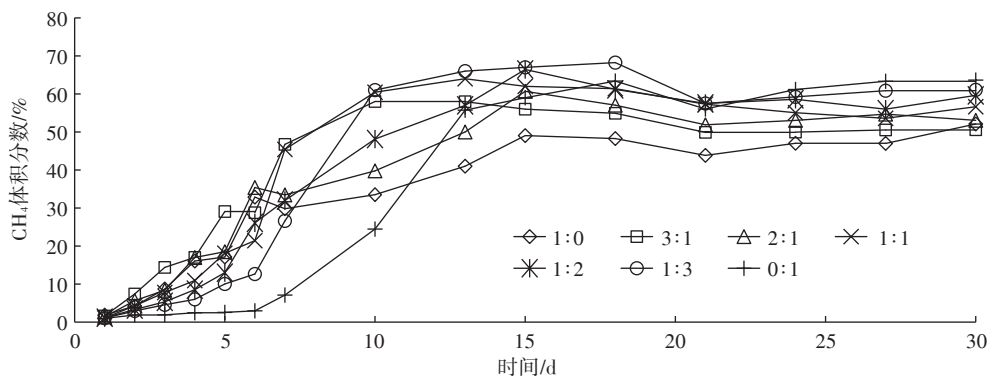


图5 各处理甲烷体积分数变化

Figure 5 The change of methane content in each treatment

进行,甲烷的浓度逐渐趋于稳定,最终维持在60%左右。其中,羊粪与尾菜各配比处理甲烷浓度随着发酵时间的延长增长较快,而羊粪单独发酵处理(1:0)与尾菜单独发酵处理(0:1)甲烷浓度则明显增加较慢。羊粪单独发酵处理甲烷浓度在整个发酵周期内均低于其他处理;尾菜单独发酵处理甲烷浓度在发酵的0~5 d几乎没有增长,发酵6 d后才呈缓慢增长趋势,前期的迟滞期较长。

2.3 羊粪与尾菜配比对TS、VS降解率的影响

不同配比发酵体系TS和VS降解率对比见图6。发酵原料的TS、VS降解率是衡量厌氧消化性能的重要指标^[30]。羊粪与尾菜不同原料配比TS、VS降解率采用发酵前后发酵体系总TS、VS量计算。由图6可知,添加尾菜各处理的TS降解率为23.2%~28.8%,均显著高于($P<0.05$)羊粪单独厌氧发酵处理;VS降解率随着尾菜比率的增加而提高,1:0、3:1、2:1、1:1、1:2、1:3、0:1处理的降解率分别为23.9%、29.4%、33.0%、33.5%、35.2%、35.4%、43.2%。

2.4 厌氧发酵甲烷转化效率

羊粪与尾菜不同配比产甲烷性能见表4。羊粪与尾菜中的碳水化合物、蛋白质等有机质组分会影响发酵原料的生物转化产甲烷效率(BDA)^[16]。半纤维素、纤维素、粗蛋白、可溶性糖、粗脂肪、VFAs的分子式可分别表示为 $C_5H_8O_4$ 、 $C_6H_{10}O_5$ 、 $C_5H_7O_2N$ 、 $C_6H_{12}O_6$ 、 $C_{57}H_{104}O_6$ 、 $C_2H_4O_2$,根据Møller等^[31]的公式计算出它们的理论VS甲烷产率分别为467、415、496、373、1014、370 $mL \cdot g^{-1}$ VS。结合羊粪与尾菜有机组分含量(图1)及VFAs含量,计算BDA,结果如表4所示。由表4可知,羊粪与尾菜配比为3:1、2:1、1:1、1:2、1:3的处理BDA值分别为49.4%、44.0%、55.9%、55.3%、60.3%,均明显高于羊粪单独发酵处理。这与各处理

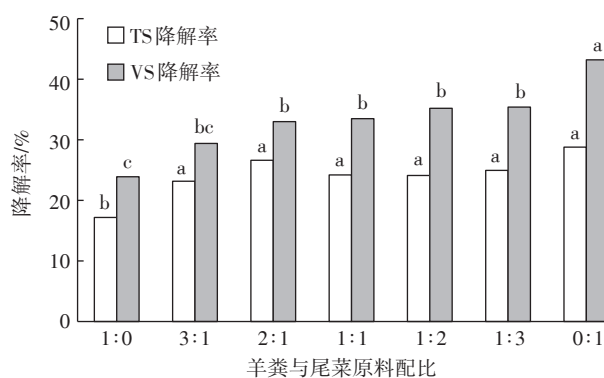


图6 不同配比发酵体系TS和VS降解率对比

Figure 6 Degradation efficiency of TS and VS in different proportions

表4 羊粪与尾菜不同配比产甲烷性能比较

Table 4 Methane producing performance comparison of different proportions

原料配比	1:0	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	0:1
Ye/ $mL \cdot g^{-1}$	148	182	159	194	185	197	198
Yt/ $mL \cdot g^{-1}$	387	368	361	348	334	327	307
BDA/%	38.2	49.4	44.0	55.9	55.3	60.3	64.6

注:Ye表示实际VS甲烷产率;Yt表示理论VS甲烷产率;BDA=Ye/Yt。

Note: Ye indicates measured cumulative methane yield; Yt indicates theoretical cumulative methane yield; BDA=Ye/Yt.

累积VS甲烷产率显示出相同的试验结果。尾菜单独发酵处理BDA值最高,达到64.6%,而羊粪单独发酵处理BDA值最低,为38.2%。从图1可以看出,尾菜纤维素含量很高,纤维素是链状高分子化合物^[32],在发酵过程中可直接被微生物利用。因此,纯尾菜处理甲烷转化效率较高。从图1亦可看出,羊粪木质素含量很高,由于木质素不易水解,故羊粪单独厌氧发酵

处理的甲烷转化效率较低。Labatut 等^[33]对数十种木质素原料进行发酵试验,结果也表明木质素高的原料甲烷产率较低。

2.5 累积 VS 甲烷产率动力学模型

试验采用修正的 Gompertz 模型模拟羊粪与尾菜联合厌氧发酵过程,模拟结果见表5,其拟合度较好, R^2 均在0.99以上。由表5可知,羊粪与尾菜不同配比处理(3:1、2:1、1:1、1:2、1:3)的预测最大日 VS 产甲烷速率均大于羊粪单独发酵处理,分别提高了58%、31.9%、110.1%、88.4%、117.4%。其中1:1与1:3处理预测最大日 VS 产甲烷速率较高,分别为14.5、15.0 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。同时羊粪与尾菜不同配比处理(3:1、2:1、1:1、1:2、1:3)的迟滞期(λ)与达到最大 VS 累积甲烷产量90%所需的时间(T_{90})均明显短于尾菜单独发酵处理,分别缩短5.8、5.8、4.6、4.0、3.2 d与3.8、2.8、6.7、4.7、5.4 d。由此可见,羊粪与尾菜联合高固体厌氧发酵可加快厌氧消化启动速率并缩短发酵周期。

2.6 羊粪与尾菜配比协同效果分析

羊粪与尾菜联合高固体厌氧发酵后,依据甲烷产率情况,对厌氧发酵协同效果进行分析。将羊粪与尾菜单独厌氧消化时累积 VS 甲烷产率数值按照羊粪与尾菜配比计算得出混合组累积 VS 甲烷产率即为预测值,将预测值与实测值进行比较,结果见表6。由表6可见,羊粪与尾菜配比为3:1、1:1、1:2、1:3处理的实测值与预测值差值分别为21.1、21.2、3.3、11.7 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$,且标准误差明显低于差值,表明均存在协同效应。可见,羊粪与尾菜联合高固体厌氧发酵可产生协同作用。混合原料发酵有利于均衡厌氧发酵体系中的营养元素,解决羊粪单独厌氧发酵产气量低和尾菜易酸化的问题,同时增加厌氧系统的缓冲能力^[34],提高厌氧发酵系统的稳定性。

表6 羊粪与尾菜配比协同效应分析

Table 6 Synergy effect analysis of different proportions

处理	实测值/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$	预测值/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$	差值/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$	标准差/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$	增率/%
1:0	147.9	—	—	4.0	—
3:1	181.6	160.5	21.1	1.3	13.0
2:1	158.7	164.7	-6.0	2.2	-3.6
1:1	194.2	173.0	21.2	4.0	12.1
1:2	184.6	181.3	3.3	1.7	2.2
1:3	197.2	185.5	11.7	5.9	5.9
0:1	198.4	—	—	1.0	—

3 结论

(1)羊粪和尾菜联合进行高固体厌氧发酵可提高产甲烷性能。与羊粪单独厌氧发酵相比,羊粪与尾菜各配比处理均可显著提高累积 VS 甲烷产率($P<0.05$);与尾菜单独厌氧发酵相比,各处理均可显著加快产甲烷速率($P<0.05$)。

(2)羊粪与尾菜联合高固体厌氧发酵符合修正的 Gompertz 方程($R^2>0.99$),可用该方程模拟该厌氧消化过程。模型模拟结果表明,羊粪与尾菜联合高固体厌氧发酵可加快厌氧消化启动速率并缩短发酵周期。

(3)在中温高固体厌氧消化工程应用中,建议羊粪与尾菜 VS 配比为1:1,设计水力停留时间为20 d,累积 VS 甲烷产率为194.2 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$ 。

参考文献:

[1] 程红胜, 向欣, 张玉华, 等. 不同因素对羊粪干法沼气发酵产气效果的影响[J]. 农机化研究, 2014(2):215-218.
CHENG Hong-sheng, XIANG Xin, ZHANG Yu-hua, et al. Different factors on the effect of dry methane fermentation of goat dung[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014(2):215-218.
[2] 孙娟, 李东, 郑涛, 等. 微量元素对蔬菜废弃物厌氧消化的促

表5 修正的 Gompertz 模型模拟结果
Table 5 Kinetics results form modified Gompertz model

参数	处理						
	1:0	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	0:1
R^2	0.992	0.993	0.992	0.995	0.997	0.997	0.993
预测最大 VS 产甲烷速率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	6.9	10.9	9.1	14.5	13.0	15.0	13.9
迟滞期 λ/d	3.8	3.3	3.3	4.5	5.1	5.9	9.1
T_{90}/d	30.7	23.0	24.0	20.1	22.1	21.4	26.8
T_d/d	26.9	19.7	20.6	15.6	16.9	15.5	17.8
预测累积 VS 甲烷产率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	155.0	178.8	156.5	188.3	184.4	194.8	206.3
实际累积 VS 甲烷产率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	147.9	181.6	158.7	194.2	184.6	197.2	198.4

注: T_{90} 为达到最大 VS 累积甲烷产量90%所需的时间; $T_d=T_{90}-\lambda$ 。
Note: T_{90} indicates the time taken to achieve 90% of maximum cumulative methane yield; $T_d=T_{90}-\lambda$.

- 进效果[J]. 新能源进展, 2018, 6(1):21-25.
- SUN Juan, LI Dong, ZHENG Tao, et al. Control of trace elements on anaerobic digestion of vegetable waste[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2018, 6(1):21-25.
- [3] 刘战广, 朱洪光, 王 彪, 等. 粪草比对于干式厌氧发酵产沼气效果的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):130-134.
- LIU Zhan-guang, ZHU Hong-guang, WANG Biao, et al. Effect of ratios of manure to crop on dry anaerobic digestion for biogas production[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4):130-134.
- [4] 王永成, 李 杰, 许宏伟. 猪鸡粪便及其不同混合配比厌氧处理性能的研究[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(7):79-83.
- WANG Yong-cheng, LI Jie, XU Hong-wei. Study on performance of anaerobic treatment of pig and chicken manure in different proportion [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(7):79-83.
- [5] Lehtomäki A, Huttunen S, Rinjala J A. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2007, 51(3):591-609.
- [6] Wang G, Gavala H N, Skiadas I V, et al. Wet explosion of wheat straw and co-digestion with swine manure: Effect on the methane productivity [J]. *Waste Management*, 2009, 29(11):2830-2835.
- [7] Somayaji D, Kbanna S. Biomethanation of rice and wheat straw[J]. *Microbiol Biotechnol*, 1994, 10(5):521-523.
- [8] 楚莉莉. 不同原料及配比厌氧发酵产气效果研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- CHU Li-li. The anaerobic fermentation biogas production effect of different organic materials and its proportion[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [9] 张洪宾, 谷 洁, 孙 薇, 等. 不同原料配比对厌氧发酵过程中产气量 VFA 和脱氢酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2):422-427.
- ZHANG Hong-bin, GU Jie, SUN Wei, et al. Effects of different rations of materials on biogas production, VFA and the activity of dehydrogenase during anaerobic process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2):422-427.
- [10] 邢 杰, 尹冬雪, 翟宁宁, 等. 羊粪与麦秆不同配比中温厌氧发酵特性[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):593-599.
- XING Jie, YIN Dong-xue, ZHAI Ning-ning, et al. Mesophilic anaerobic digestion of sheep manure and wheat straw mixture with different mixing ratios[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):593-599.
- [11] 韩文彪, 徐 霞, 赵玉柱, 等. 城市有机垃圾与羊粪联合厌氧消化产沼气研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(1):25-28.
- HAN Wen-biao, XU Xia, ZHAO Yu-zhu, et al. Anaerobic co-digestion of municipal organic garbage and sheep manure and its biogas production[J]. *China Biogas*, 2016, 34(1):25-28.
- [12] 李木子, 孙军德. 猪羊粪及其配比发酵沼气试验初报[J]. 微生物学杂志, 2010, 30(2):95-98.
- LI Mu-zi, SUN Jun-de. Preliminary report on the biogas fermentation with pig and sheep dung mixed proportion[J]. *Journal of Microbiology*, 2010, 30(2):95-98.
- [13] Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 59(5):927-934.
- [14] 国家保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Ministry of Environmental Protection of China. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 吕丹丹, 席北斗, 李秀金, 等. 不同混合比牛粪玉米秸中温干发酵产沼性能[J]. 环境工程学报, 2012, 6(6):2055-2060.
- LÜ Dan-dan, XI Bei-dou, LI Xiu-jin, et al. Mesophilic dry anaerobic digestion biogas performance of different mix ratios of cow manure and corn straw[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(6):2055-2060.
- [16] 周 颖, 张克强, 刘丽丽, 等. 木质纤维类农林加工废弃物厌氧发酵产甲烷潜力研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(4):586-591.
- ZHOU Ying, ZHANG Ke-qiang, LIU Li-li, et al. Assessment of biochemical methane potential for lignocellulosic agriculture and forestry processing waste[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(4):586-591.
- [17] 吴晓杰. 不同处理方式对青贮饲料质量影响的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- WU Xiao-jie. Effects of different treatments on fermentation quality of silage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [18] 徐美蓉, 李晓蓉, 李 婷. 响应面分析优化蒽酮硫酸法测定葡萄叶片中可溶性糖的含量[J]. 甘肃农业科技, 2017(11):25-29.
- XU Mei-rong, LI Xiao-rong, LI Ting. Determination of soluble sugar from grape leaves by optimizing of anthrone-sulfuric acid method by response surface methodology[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2017(11):25-29.
- [19] 张艳艳, 韩秀丽. 气相色谱法测定沼气中的甲烷[J]. 环境工程, 2010, 28(3):113-114.
- ZHANG Yan-yan, HAN Xiu-li. Determination of methane component in biogas by gas chromatography[J]. *Environmental Engineering*, 2010, 28(3):113-114.
- [20] 张俊瑜, 苏玲玲. 不同前处理对气相色谱法测定瘤胃中挥发性脂肪酸的影响[J]. 草食家畜, 2017(3):30-34.
- ZHANG Jun-yu, SU Ling-ling. Effects of different pretreatment methods on the determination of volatile fatty acids in rumen by gas chromatography[J]. *Grass-Feeding Livestock*, 2017(3):30-34.
- [21] 胡荣笃. 用乙酸计量各种脂肪酸时的换算方法[J]. 中国沼气, 1995, 13(2):46-47.
- HU Rong-du. Conversion of various fatty acids with acetic acid[J]. *China Biogas*, 1995, 13(2):46-47.
- [22] 宋香育, 张克强, 房 芳, 等. 工艺措施对猪粪秸秆混合厌氧干发酵产气性能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11):233-239.
- SONG Xiang-yu, ZHANG Ke-qiang, FANG Fang, et al. Influences of different technological strategies on performance of anaerobic co-digestion of pig manure with straw in solid-state[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(11):233-239.

- [23] Vavilina V A, Lokshina L Y, Jokelab J P Y. Modeling solid waste decomposition[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94(1):69-81.
- [24] Zhang W Q, Lang Q Q, Wu S B. Anaerobic digestion characteristics of pig manures depending on various growth stages and initial substrate concentrations in a scaled pig farm in Southern China[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 156:63-69.
- [25] Zhang W Q, Wei Q Y, Wu S B. Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions[J]. *Applied Energy*, 2014, 128:175-183.
- [26] Zhang S T, Guo H G, Du L Z. Influence of NaOH and thermal pretreatment on dewatered activated sludge solubilisation and subsequent anaerobic digestion: Focused on high-solid state[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 185:171-177.
- [27] 路娟娟, 张无敌, 刘士清, 等. 羊粪沼气发酵过程中的纤维素酶酶活力与沼气产气量的关系研究[J]. 可再生能源, 2007, 25(6):40-42.
- LU Juan-juan, ZHANG Wu-di, LIU Shi-qing, et al. Study on the relation between cellulose activity and methane output during the methane fermentation of goat dung[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(6):40-42.
- [28] 宋亚楠, 宋梓梅, 裴梦富, 等. 蔬菜类废弃物甲烷发酵的产气潜能及过程特征[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2):645-653.
- SONG Ya-nan, SONG Zi-mei, PEI Meng-fu, et al. Biogas production potential and process character of methane fermentation of vegetable waste[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(2):645-653.
- [29] 张 鸣, 高天鹏, 常国华, 等. 猪粪和羊粪与麦秆不同配比中温厌氧发酵研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9):2131-2134.
- ZHANG Ming, GAO Tian-peng, CHANG Guo-hua, et al. Study on mesophilic anaerobic fermentation of different mixture of respective pig and sheep manure with wheat straw[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9):2131-2134.
- [30] 杜连柱, 梁军锋, 杨 鹏, 等. 猪粪固体含量对厌氧消化产气性能影响及动力学分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24):246-251.
- DU Lian-zhu, LIANG Jun-feng, YANG Peng, et al. Influence of total solid content on anaerobic digestion of swine manure and kinetic analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(24):246-251.
- [31] Møller H B, Sommer S G, Ahring B K. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(5):485-495.
- [32] 陈洪章. 纤维素生物技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- CHEN Hong-zhang. Cellulose biotechnology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [33] Labatut R A, Angenent L T, Scott N R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):2255-2264.
- [34] 高 健, 袁海荣, 邹德勋, 等. 鸡粪与 NaOH 预处理麦秸联合厌氧发酵产气性能与协同效果研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(7):98-103.
- GAO Jian, YUAN Hai-rong, ZOU De-xun, et al. Performance and synergistic effect of anaerobic co-digestion of chicken manure and pretreated wheat straw with NaOH[J]. *Renewable Energy Resources*, 2012, 30(7):98-103.