

# 温度对蔬菜垃圾与猪粪混合消化产沼气特性的影响

任海伟<sup>1,3</sup>, 王宇杰<sup>1,2</sup>, 李金平<sup>1,3</sup>, 许 哲<sup>1,3</sup>, 李志忠<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 兰州 730050;

3. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050)

**摘 要:** 采用批式厌氧消化实验,在10 L反应系统中将蔬菜垃圾与猪粪以1:2质量比进行混合发酵,探究温度(20、32、37、52 ℃)对二者混合消化产气特性的影响。结果表明,中、高温(32、37、52 ℃)条件下混合发酵系统稳定,室温(20 ℃)发酵后期有轻微酸抑制。32 ℃时产沼气性能最佳,总产气量分别是20、37和52 ℃时的4.65、2.08和1.42倍,发酵过程中pH值、挥发性脂肪酸和氨氮浓度均在正常范围。3 m<sup>3</sup>户用沼气池试验表明,蔬菜与猪粪32 ℃混合发酵的池容产气率为0.56 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d),平均甲烷体积分数为54.83%,日平均产气量为1.68 m<sup>3</sup>。蔬菜与猪粪32 ℃混合发酵既可维持发酵系统稳定性,又能改善产沼气性能,为蔬菜废弃物的沼气化处理提供参考。

**关键词:** 厌氧消化; 蔬菜废弃物; 温度; 猪粪; 沼气

**中图分类号:** S216.4

**文献标识码:** A

## 0 引 言

中国蔬菜种植面积和产量均居世界首位,随着设施园艺和蔬菜加工技术的发展及净菜商品化流通,蔬菜垃圾(vegetable wastes, VWs)数量逐年攀升,VWs的减量化、无害化和资源化利用势在必行。与堆肥、堆沤等<sup>[1]</sup>肥料化利用方式相比,厌氧消化能将VWs有机质转化为沼气,提供清洁能源的同时,既能减少环境污染又能提供沼液/沼渣有机肥。故沼气化利用是处理VWs的良好选择<sup>[2]</sup>。然而,VWs单独发酵易发生挥发酸累积和酸化现象,导致产气周期短、产气量少<sup>[3]</sup>。研究表明,VWs与畜禽粪便<sup>[4,5]</sup>、餐厨垃圾<sup>[6]</sup>、屠宰废水<sup>[7]</sup>、污泥<sup>[8]</sup>等混合发酵能延长发酵周期,提高产气量,是避免VWs单独发酵快速酸化和产甲烷菌群被抑制的有效途径。另一方面,温度是影响厌氧发酵产沼气效果和微生物菌群活性的重要因素之一。中温35 ℃和高温55 ℃是沼气发酵的2个高峰。刘荣厚等<sup>[9]</sup>认为中温(35 ℃)时VWs单独发酵的产气效果优于高温(55 ℃)和室温(24 ℃),而Bouallagui等<sup>[10]</sup>则认为果蔬废弃物在55 ℃时的产气速率高于35 ℃和20 ℃,这说明不同底物原料发酵系统的适宜反应温度存

在差异。

为克服VWs单独厌氧发酵缺陷,改善产气性能,本文在前期研究基础上<sup>[11]</sup>,以甘蓝菜为原料,将其与猪粪进行批式混合发酵,考察不同温度下二者混合消化的产气性能,结合挥发性脂肪酸、碱度、氨氮、pH值等指标对发酵过程进行分析,筛选适宜的发酵温度范围,为VWs的沼气化利用提供参考。

## 1 实 验

### 1.1 试验装置

试验采用兰州理工大学西部能源与环境研究中心自行设计的可控型恒温发酵装置(图1)。装置由加热水箱、温控仪、容积为10 L的圆柱形304不锈钢发酵罐(高径比1:1)和集气装置组成,发酵罐与环境绝热,发酵罐温度通过调节加热水箱的流水速度控制,温度用Pt100铂电阻测量(精度±0.1 ℃)。

### 1.2 试验材料

选取甘蓝菜为蔬菜垃圾的代表,从兰州市七里河区菜市场收集后用刀切成2~3 cm的碎段待用;

收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(51366009; 51666010); 甘肃省自然科学基金(1606RJZA206; 1606RJYA287)

通信作者: 李金平(1977—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事先进可再生能源系统方面的研究。lijinping77@163.com

猪粪取自兰州市七里河区晏家坪农户养殖场;接种物为本实验室的中温厌氧发酵沼液;上述原料的特性参数如表 1 所示。

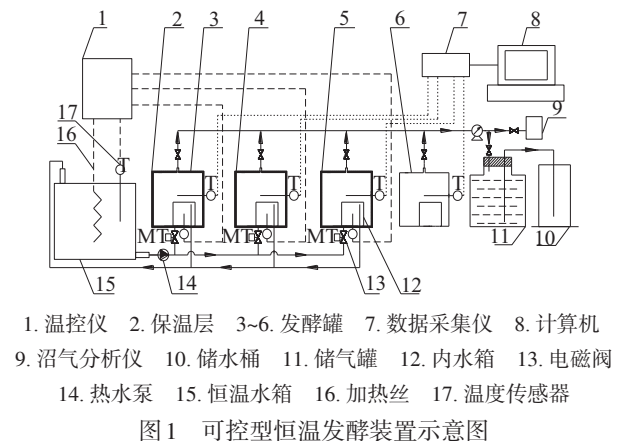


图 1 可控型恒温发酵装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of controllable constant-temperature fermenting equipment

表 1 厌氧消化原料的特性参数			
Table 1 Characteristic parameters of anaerobic digestion feedstock			
含量/%	甘蓝菜	猪粪	沼液接种物
TS	15.79±0.01	36.08±0.02	5.11±0.00
VS	12.23±0.00	23.23±0.01	2.78±0.00

### 1.3 主要仪器与设备

TDL-5-A 离心机(上海安亭科学仪器厂);GZX-9240MBE 数显鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司);UV-9200 紫外可见分光光度计(北京瑞利分析仪器公司);Biogas check 沼气分析仪(英国 Geotech 公司)。

### 1.4 试验设计

参考前期试验结果,设置甘蓝菜与猪粪的质量比为 1:2<sup>[11]</sup>,沼液接种质量分数为 30%,甘蓝菜、猪粪、沼液的添加质量分别为 0.600、1.200、1.785 kg,进料后补蒸馏水至 5.885 kg,TS 浓度为 10.52%。发酵罐温度分别设置为 20、32、37、52 ℃,依次命名 A、B、C 和 D 组。发酵之前接种沼液提前驯化富集培养 15 d。每组试验进行 3 次平行,7 d 内无气体产生则试验终止。每天测定发酵液 pH 值、气体成分和产气量,并定期测定发酵液的碱度(alkalinity, Alk)、挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)和氨氮(ammonia nitrogen, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)等指标。

### 1.5 分析方法

TS 和 VS 采用减重法测定,测定温度分别为 105 ℃和 550 ℃。气体样品组分用沼气分析仪测定。pH 值用便携式 pH 计测定。VFAs 用分光光度法测定。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 用苯酚次氯酸钠比色法测定。碱度采用酸碱指示剂滴定法测定。

### 1.6 统计方法

试验数据采用 SPSS 软件处理,置信水平为 95%时,  $p < 0.05$  说明数据在统计学上存在显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 日产气量和日产甲烷量变化

由图 2a 可知,4 个试验组在发酵第 1 天即出现产气高峰,且 D 组最高,B 和 C 组次之,A 组最低。随后,B 组在第 6、9、22 和 26 天有 4 个产气高峰,分别为 9.95、10.34、9.43 和 3.34 L/d,产气集中在第 5~26 天;C 组在第 4、7、13、17 和 25 天的产气峰值分别为 5.14、4.49、3.14、4.14 和 8.31 L/d,产气集中在第 3~25 天;D 组在第 9、25 和 29 天的产气高峰分别为 3.90、8.31 和 8.49 L/d,产气集中在第 8~30 天。试验中出现多个产气高峰的原因在于:底物中复杂有机物降解难易程度不同,当大分子有机质水解、产酸速率与产甲烷速率无法保持平衡时,易出现产气波动。A 组未出现明显尖峰,仅在第 2~15 天维持较高产气量,15 d 后产气量逐渐下降直至不产气。B 组在发酵中前期(第 3~25 天)的日产气量明显高于 C 和 D 组;发酵中后期(第 26~42 天)D 组日产气量高于 B 组,A 和 C 组几乎不产气。

由图 2b 可知,发酵初期(第 0~3 天)均未出现产甲烷高峰,3 d 后日产甲烷量趋势与日产气量基本相似,也出现多个高峰,且产甲烷高峰与产气高峰几乎一致。另外,与 A、B 和 C 这 3 个试验组不同,D 组的产沼气和产甲烷高峰多集中在发酵后期。因为试验中的接种物为中温发酵产物,所含产甲烷菌群多属于中温嗜温菌,接种到高温发酵体系中后尚需驯化适应,故高温发酵中前期微生物活性较低,产气缓慢;随着反应的进行,产甲烷菌被高温环境驯化,日产甲烷量增加。而且,高温环境有利于纤维素酶等酶活性的提高,强化了纤维素分解,

使发酵后期产甲烷菌群能获得更多养分<sup>[10]</sup>。

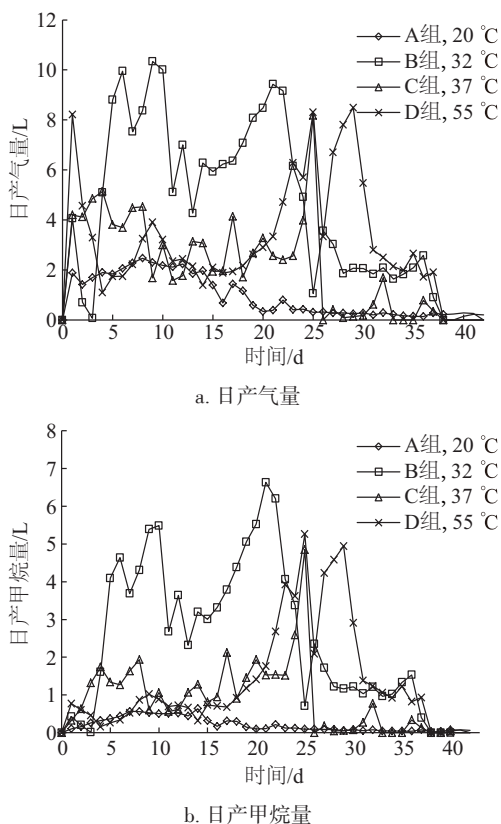


图2 温度对日产气量和日产甲烷量的影响

Fig. 2 Effects of temperature on daily biogas and bio-methane production during anaerobic digestion

## 2.2 甲烷体积分数变化

由图3可知,4个试验组的甲烷体积分数均呈先增大后减小的趋势。B组甲烷含量在第8天即增至50%以上,37 d后才开始低于50%,高甲烷含量(>50%)持续时间约30 d;C和D组甲烷含量分别第17和21天升至50%以上,分别第26和33天减至50%以下,这2组高甲烷含量的持续时间仅有9和12 d。发酵初期主要以产酸菌群的酸化反应为主,生成产甲烷菌易于利用的乙酸、 $\text{CO}_2$ 等物质,故沼气中 $\text{CH}_4$ 含量较低。到发酵中期,随着产甲烷菌的生长繁殖,沼气中甲烷含量逐步升高<sup>[12]</sup>。进入发酵后期,有机物分解趋于缓慢,可利用的小分子中间产物浓度降低,B、C和D组的甲烷含量均开始减小。但A组甲烷含量一直维持在25%~30%之间,直至第37天开始迅速减小。室温时产酸菌活力旺盛导致氢累积,而产甲烷菌活力恢复缓慢,这种不协调代谢进程使甲烷产量被抑制。整个发酵周期

内,A、B、C和D组的平均甲烷含量依次为22.25%、55.33%、42.14%和43.91%,B组平均甲烷含量最高,沼气品质最好。

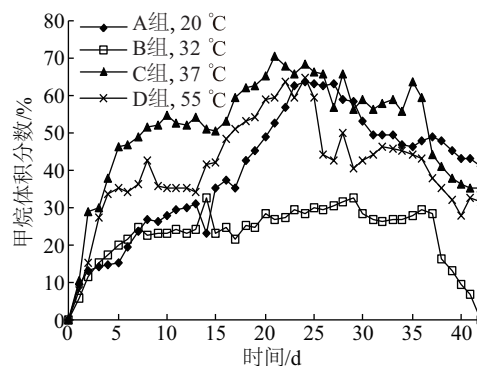


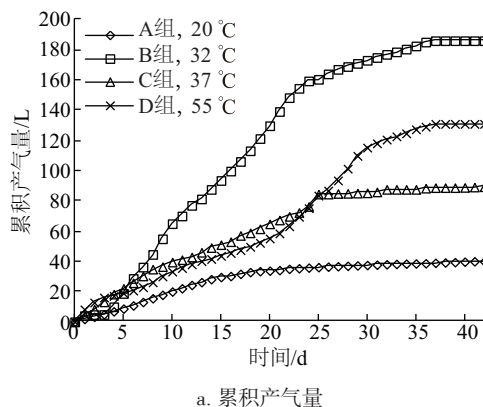
图3 温度对甲烷体积分数的影响

Fig. 3 Effect of temperature on methane concentrations during anaerobic digestion

由图3还可知,发酵中前期的B和C组甲烷含量增速较快,且高于A和D组。到发酵中后期(第26~42天),甲烷含量高低顺序依次为 $B > D > C > A$ ,说明不同发酵阶段温度对甲烷含量的影响有所差异。因为试验中接种物所含的产甲烷菌群多属于中温嗜温菌,中温发酵有利于产甲烷菌活性的较快恢复;而在高温或室温环境下,厌氧微生物遇到环境变化,影响了产甲烷菌群活性的恢复。

## 2.3 累计产气量和累积甲烷产量变化

图4为不同温度下累积产气量和累积甲烷产量情况。由图4可知,4个试验组的累积产气量和产甲烷量变化趋势基本相同,均表现为先增加后趋于稳定。发酵结束时A、B、C和D组累计产气量分别为40.02、186.05、89.37和131.00 L,累积甲烷产量分别为8.90、102.93、37.66和57.51 L。



a. 累积产气量



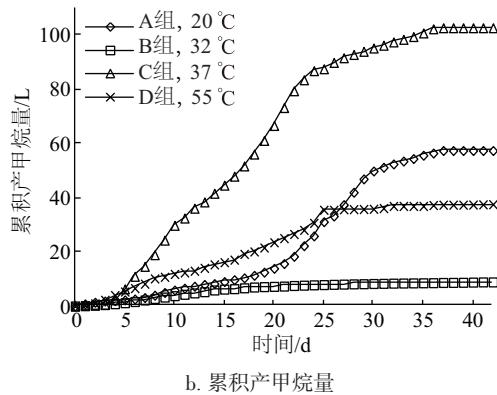


图4 温度对累积产气量和累积产甲烷量的影响

Fig. 4 Effect of temperature on accumulated biogas and methane production during anaerobic digestion

从表2各项参数来看,B组日均产气量、池容产气率、TS产气(甲烷)率、VS产气(甲烷)率均显著高于其余3组,D组次之,A组最差,说明温度高低对发酵系统的产气性能有显著影响。总之,4个试验组中B组32℃产气性能最好,该组VS产甲烷率为256.24 L CH<sub>4</sub>/kg VS,略高于Molinuevo-Salces等<sup>[13]</sup>报道的猪粪或家禽粪便分别与蔬菜加工废弃物的混合发酵产甲烷率244 L CH<sub>4</sub>/kg VS、233 L CH<sub>4</sub>/kg VS;但又低于Gunaseelan等<sup>[14]</sup>报道的甘蓝菜叶产甲烷率309 L CH<sub>4</sub>/kg VS和Lin Jia等<sup>[15]</sup>报道的果蔬废弃物产甲烷率420 L CH<sub>4</sub>/kg VS。同时,B组中的VS产沼气率为463.16 L/kg VS,略低于Bouallagui等<sup>[16]</sup>报道的果蔬废弃物与屠宰废水或活性污泥共发酵产气率490~510 L/kg VS,但高于Garcia-Peña等<sup>[17]</sup>报道的果蔬废弃物和肉渣共发酵产气率420 L/kg VS。Garcia-Peña等<sup>[17]</sup>还发现果蔬

表2 不同温度发酵时的产气特性比较

Table 2 Comparison of biogas-producing characteristics in different temperature

项目	20 °C	32 °C	37 °C	55 °C
日均产气量/L	0.95 <sup>a</sup>	4.43 <sup>b</sup>	2.13 <sup>c</sup>	3.12 <sup>d</sup>
池容产气率/m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup>	0.09 <sup>a</sup>	0.44 <sup>b</sup>	0.21 <sup>c</sup>	0.31 <sup>d</sup>
TS产气率/L·(kg TS) <sup>-1</sup>	64.66 <sup>a</sup>	300.61 <sup>b</sup>	144.40 <sup>c</sup>	211.67 <sup>d</sup>
VS产气率/L·(kg TS) <sup>-1</sup>	99.63 <sup>d</sup>	463.16 <sup>a</sup>	222.48 <sup>c</sup>	326.11 <sup>b</sup>
TS产甲烷率/L·(kg TS) <sup>-1</sup>	14.39 <sup>a</sup>	166.31 <sup>b</sup>	60.85 <sup>c</sup>	92.92 <sup>d</sup>
VS产甲烷率/L·(kg TS) <sup>-1</sup>	22.17 <sup>d</sup>	256.24 <sup>a</sup>	93.75 <sup>c</sup>	143.16 <sup>b</sup>

注:同行相同字母表示差异不显著( $p > 0.05$ ),不同字母表示差异显著( $p > 0.05$ )。

废弃物与肉渣共消化后的TS产甲烷率为250 L/kg,高于本文结果166.31 L/kg。上述厌氧发酵产气特性结果之间的差异,原因可能是由于混合发酵的原料种类、消化工艺、反应温度等发酵条件不同,而有机底物原料的产甲烷潜力和消化特性因反应条件的不同会有很大差异。

## 2.4 pH值变化

由图5可看出,发酵启动阶段(第0~3天),4个试验组的pH值均有所下降,其中D组降幅较小,B组降幅最大,在第3天pH值最低(为6.7)。因为发酵初期,底物中丰富的有机物为适应环境快及代谢能力强的产酸菌提供了生长繁殖的机会,将有机物迅速分解为有机酸;而适应环境慢及代谢能力弱的产甲烷菌还无法利用有机酸,使其形成一定程度积累,pH值下降。随着反应的进行,产甲烷菌对环境逐渐适应,利用VFAs的速度加快,同时底物中分解滞后的含氮有机物开始分解,氨氮浓度迅速增加,双重作用使pH值的下降趋势受到抑制,第4天时pH值即回升至约7.5<sup>[18]</sup>。发酵中前期(第5~20天),4个试验组的pH值在7.1~7.8范围内波动,且B和C组略高于A和D组。该阶段是产甲烷主要阶段,酸化产生的VFAs被产甲烷菌代谢转化为CH<sub>4</sub>,水解酸化进程与产甲烷反应达到适度平衡,使pH值稳定在产甲烷菌适宜范围(7.4~7.9)。

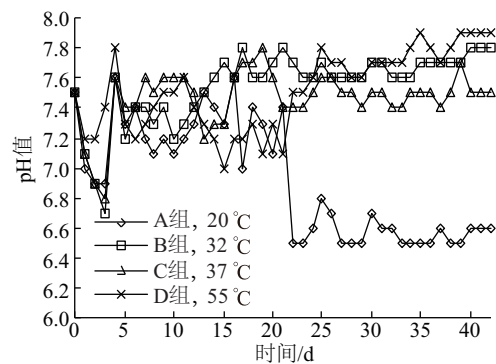


图5 温度对发酵过程中pH值变化的影响

Fig. 5 Effect of temperature on pH value variation during anaerobic digestion

发酵中后期(第21~42天),B、C和D这3组pH值仍维持在产甲烷菌适宜范围,而A组在第22天后突降至6.5。这可能是因为室温时的产甲烷菌群活性相对较低,产酸菌占据优势,生长旺盛,甲烷化反应被抑制,酸化产生的有机酸未能及时消耗,使

pH 值维持在低水平。刘荣厚等<sup>[19]</sup>和刘 芳等<sup>[20]</sup>发现蔬菜单独发酵极易酸化水解,易发生酸积累或酸抑制现象。本试验中,甘蓝菜与猪粪室温发酵后期仍出现酸抑制现象,导致产气几乎停止;而中、高温发酵时多种细菌间能相互协同发展,菌群代谢活性充分发挥,有机酸产物不易积累。

## 2.5 VFAs质量浓度变化

VFAs 是厌氧发酵产酸阶段的主产物,也是产甲烷菌群代谢利用的主要底物。由图 6 可知,4 个试验组的 VFAs 浓度均呈先增后减的趋势。发酵初期有机物被充分酸化降解,产生了大量丁酸、乙酸和  $H^+$  等水溶性有机物,使产氢、产酸菌的生长繁殖速度加快,VFAs 浓度不断积累并达到各自峰值。但 4 组的增速和增幅却各有不同,其中 D 组最快,A 和 C 组次之,B 组最慢,因为高温时水解速率是中温的 5~6 倍<sup>[11]</sup>。同时,室温或高温时 VFAs 浓度高于中温,其中 B 组始终处于最低值。由于不同温度的发酵效率由相应温度类型的微生物所决定,故中温发酵有利于刺激产甲烷菌群的繁殖生长,活跃的产甲烷菌将 VFAs 不断代谢利用,既消除了有机酸反馈抑制,又促进 VFAs 正向生成,使 B 和 C 组保持较低 VFAs 浓度,尤其 B 组始终低于 125 mg/L。Banks 等<sup>[21]</sup>认为 VFAs 浓度低于 500 mg/L 更有利于产甲烷进程的稳定。经高温驯化的发酵系统内多为对有机物降解能力较强的嗜热菌,产酸速率快,而产甲烷菌活性的恢复相对滞后,造成 D 组 VFAs 浓度处于高位。

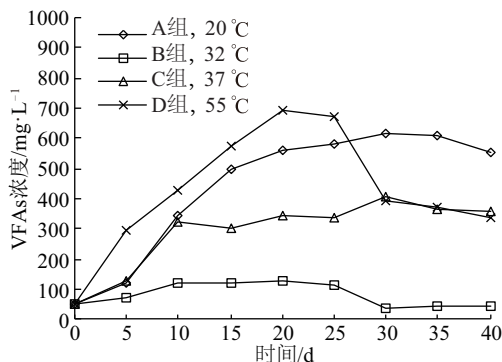


图6 温度对挥发性脂肪酸(VFAs)含量的影响

Fig. 6 Effect of temperature on VFAs during anaerobic digestion

发酵中后期,各组 VFAs 浓度有不同程度的减小,其中 A 和 C 组第 30 天开始减小,B 和 D 组第

25 天后快速减小。但总体上,A 组浓度较高,D 组和 C 组次之,B 组仍为最低。结合产气特性和 pH 值,D 组 VFAs 浓度的快速减小与累计产气量快速增大和日产气高峰频发相一致(图 2 和图 4),说明 VFAs 被高温驯化的产甲烷菌代谢利用转变为沼气。A 组 VFAs 浓度最高的原因存在于室温时产甲烷菌活性较低,有机酸被代谢利用的速度远低于其生成速度,造成轻微酸抑制,图 5 中 A 组 pH 值突降至 6.5 也印证了这一点。

## 2.6 温度对挥发酸/碱度(VFAs/Alk 比值)影响

VFAs/Alk 比值是衡量厌氧发酵系统稳定性的重要指标之一。若该比值小于 0.4,系统稳定;介于 0.4~0.8 时,稳定性变差;高于 0.8 时,系统明显不稳定。由图 7 可知,4 个试验组的 VFAs/Alk 比值均低于 0.1,且碱度介于 7000~14000 mg/L 之间,这与 Lane 等<sup>[22]</sup>报道的稳定发酵的果蔬废弃物碱度高于 1500 mg/L,VFAs/Alk 比值低于 0.7 相符合。说明甘蓝菜与猪粪混合发酵具有良好缓冲能力,有利于保持发酵系统稳定运行。值得注意的是,A 和 D 组的 VFAs/Alk 比值波动较大,尤其 A 组呈波动上升,意味着室温发酵时 VFAs 浓度变化与碱度调节存在不协调现象,这与发酵后期 A 组较高 VFAs 浓度和较低 pH 值结果一致(图 5 和图 6)。

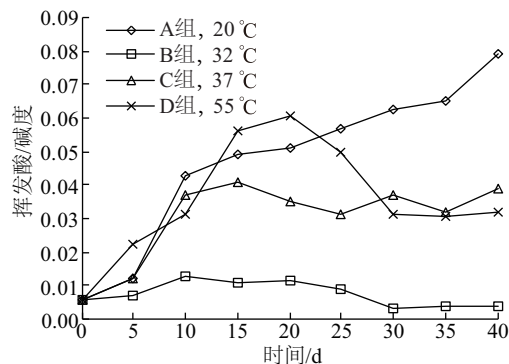


图7 温度对挥发酸/碱度比值的影响

Fig. 7 Effect of temperature on VFAs/Alk during anaerobic digestion

## 2.7 温度对氨态氮( $NH_4^+-N$ )浓度的影响

由图 8 可知,4 个试验组的  $NH_4^+-N$  浓度均呈“增—减—增—稳定”趋势。发酵初期,底物中含氮有机物水解导致  $NH_4^+-N$  浓度增加,且温度越高,  $NH_4^+-N$  生成速度越快。D 组增速最快,B 和 C 组次

之。因为高温发酵系统内嗜热菌种对有机物降解能力优于中温嗜温菌和低温菌。发酵中期, A 和 D 组的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度高于 B 和 C 组, 该阶段是产甲烷菌最活跃的产气阶段, 产甲烷菌对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的消耗速率大于其生成速率。而高温和室温时的产甲烷菌数量和活性还相对较低,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  消耗速率低于生成速率。这与刘荣厚等<sup>[9]</sup>和 Haeis 等<sup>[23]</sup>的结果一致。之后, 由于底物被不断消耗,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  生成速率放缓, 且产甲烷菌群数量和活性的增加也使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  被迅速消耗代谢, 双重作用使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度降低, 到发酵后期(第 30~42 天), 产甲烷菌数量达到稳定期, 氮源需求减少, 而含氮有机物的水解仍在进行,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度再次升高。到了发酵末期,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的产生或消耗趋于稳定<sup>[23]</sup>。有学者认为较低浓度 ( $\leq 200 \text{ mg/L}$ )  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  对厌氧发酵过程更有利, 而浓度过高 ( $\geq 700 \text{ mg/L}$ ) 则可能通过影响厌氧菌群细胞内 pH 值、抑制甲烷合成酶反应等方式引起产甲烷菌活性下降, 降低产气量, 该结果与本文一致<sup>[24]</sup>。

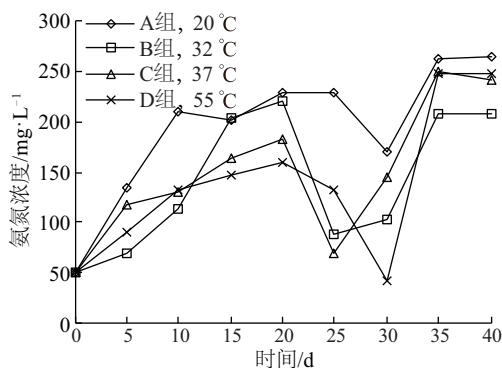


图8 温度对氨氮浓度的影响

Fig. 8 Effect of temperature on  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  during anaerobic digestion

## 2.8 32 °C混合发酵的3 m<sup>3</sup>户用沼气池中试试验

利用 3 m<sup>3</sup> 户用太阳能恒温沼气池进行 32 °C 中试发酵试验, 结果如图 9 和图 10 所示。甘蓝菜与猪粪发酵 7 d 后甲烷含量即升至 50% 以上, 直至 42 d 发酵结束。发酵前 26 天产气较快, 且产气高峰频发, 与 10 L 发酵罐结果相似。第 42 天时的累积产气量和累积产甲烷量分别为 70.52 m<sup>3</sup> 和 38.67 m<sup>3</sup>, 日平均产气量为 1.68 m<sup>3</sup>; 池容产气率为 0.56 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 高于 10 L 发酵罐结果; 平均甲烷体积分数为 54.83%, 与 10 L 发酵罐结果接近。

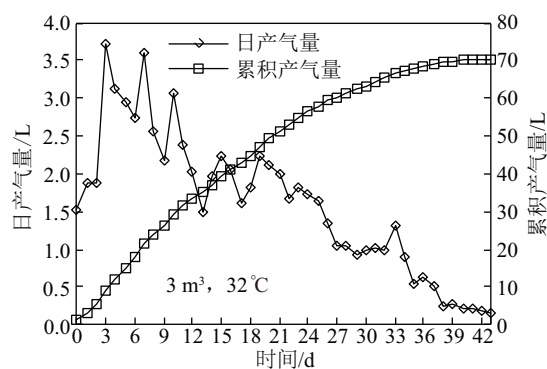


图9 户用太阳能恒温沼气池日产气量和累积产气量

Fig. 9 Daily biogas production and accumulated biogas production of solar heating thermostat biogas digester

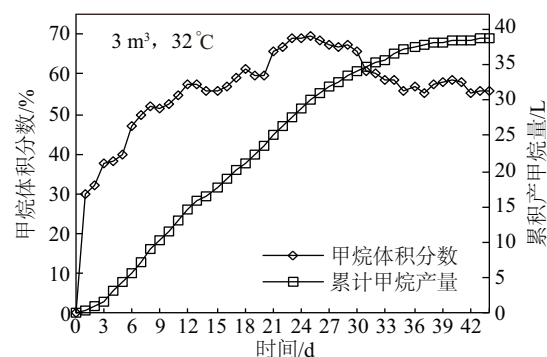


图10 户用沼气池发酵的甲烷含量和累积产甲烷量

Fig. 10 Methane concentrations and accumulated methane production of solar heating thermostat biogas digester

## 3 结 论

1) 中、高温条件下, 甘蓝菜与猪粪混合厌氧发酵避免了 VFAs 积累造成的酸化和 pH 值降低现象, 发酵系统运行稳定。发酵液 pH 值、挥发性脂肪酸和氨态氮浓度维持在正常范围, 有利于消化反应的持续进行。

2) 与 20、37 和 52 °C 试验组相比, 甘蓝菜与猪粪在 32 °C、质量比 1:2、10 L 发酵罐中进行批式混合发酵的产气效果最好, 42 d 发酵周期内的总产气量为 186.05 L, 分别是 20、37 和 52 °C 时的 4.65、2.08 和 1.42 倍。32 °C 时的 TS 产气率为 300.61 L/kg TS, VS 产气率为 463.16 L/kg VS, 平均甲烷体积分数为 55.33%, 池容产气率为 0.44 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 产气特性和产气品质均比其余 3 个温度组好。

3) 通过 3 m<sup>3</sup> 户用沼气池进行的 32 °C 中试发酵试验, 42 d 时的累积产气量和累积产甲烷量分别为

70.52 m<sup>3</sup> 和 38.67 m<sup>3</sup>, 池容产气率为 0.56 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 平均甲烷体积分数为 54.83%, 日平均产气量为 1.68 m<sup>3</sup>。

兰州市的榆中、皋兰等地是高原夏菜主产区, 每年产生蔬菜垃圾 200 万 t, 给当地农村环境带来严重污染和健康困扰。通过鼓励菜农使用以蔬菜垃圾和猪粪为原料的户用沼气池, 不仅能满足 4~5 口单户家庭的生活燃气需求, 还可将蔬菜垃圾污染消除在种植源头, 减少对城市环境的二次危害。另外, 对节约农村能源消耗、改善农村人居环境也有重要意义。

### [参考文献]

- [1] 李 剑, 李玉奇, 王 涛, 等. 蔬菜废弃物、稻草与猪牛粪不同配比厌氧堆肥研究[J]. 上海交通大学学报, 2011, 29(1): 54—57.
- [1] Li Jian, Li Yuqi, Wang Tao, et al. Study on composting of vegetable wastes and cattle manure, swine manure in different ratios[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 29(1): 54—57.
- [2] Romano R T, Zhang R H. Anaerobic digestion of onion residuals using a mesophilic anaerobic phased solids digester[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(10): 4174—4179.
- [3] Bouallagui H, Touhami Y, Ben Cheikh R, et al. Bioreactors performance used in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Review[J]. Process Biochemistry, 2005, 40(3): 989—995.
- [4] Molinuevo-Salces B, Gonzalez-Fernandez C, Gomez X, et al. Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 36—42.
- [5] Saev M, Koumanova B, Simeonov I V. Anaerobic codigestion of wasted tomatoes and cattle dung for biogas production [J]. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 2009, 44(1): 55—60.
- [6] 孙玉辉, 刘 齐, 姜 月, 等. 蔬菜与餐厨垃圾厌氧发酵启动阶段微生物分析[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 310—316.
- [6] Sun Yuhui, Liu Qi, Jiang Yue, et al. Analysis of microorganism at starting stage of anaerobic fermentation of vegetable waste and restaurant garbage [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(1): 310—316.
- [7] Bouallagui H, Rachdi B, Gannoun H, et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic co- digestion of abattoir wastewater and fruit and vegetable waste in anaerobic sequencing batch reactors[J]. Biodegradation, 2009, 20(3): 401—409.
- [8] Cara J, Gomez X, Cueto M J, et al. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate [J]. Renewable Energy, 2006, 31(12): 2017—2024.
- [9] 刘荣厚, 王远远, 孙 辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 116—121.
- [9] Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 116—121.
- [10] Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, et al. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(12): 2143—2148.
- [11] 周丹丹. 混合原料批次恒温厌氧发酵动力学过程研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [11] Zhou Dandan. Research of kinetics process of co-digestion under the condition of thermostatic and batch mode[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [12] Sitorus B, Sukandar, Panjaitan S D. Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit-vegetable wastes [J]. Energy Procedia, 2013, 32(1): 176—182.
- [13] Molinuevo-Salces B, Gómez X, Morán A, et al. Anaerobic co-digestion of livestock and vegetable processing wastes: Fibre degradation and digestate stability[J]. Waste Manag, 2013, 33(6): 1332—1338.
- [14] Gunaseelan V N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26(4): 389—399.
- [15] Lin Jia, Zuo Jiane, Gan Lili, et al. 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.
- [16] Bouallagui H, Lahdheb H, Ben Romdan E, et al. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co- substrates



- addition [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(5): 1844—1849.
- [17] Garcia-Peña E I, Parameswaran P, Kang D W, et al. Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(20): 9447—9455.
- [18] Alkaya E, Demirel G N. Anaerobic acidification of sugar-beet processing wastes: Effect of operational parameters [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(1): 32—39.
- [19] 刘荣厚, 王远远, 孙 辰, 等. 蔬菜废弃物厌氧发酵制沼气的试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 209—213.
- [19] Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, 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.
- [20] 刘 芳, 邱 凌, 李自林, 等. 蔬菜废弃物厌氧发酵产气特性 [J]. *西北农业学报*, 2013, 22(10): 162—170.
- [20] Liu Fang, Qiu Ling, Li Zilin, et al. Gas characteristics generated from vegetables wastes by anaerobic fermentation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(10): 162—170.
- [21] Banks C J, Zhang Y, Jiang Y. Trace element requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 104(1): 127—135.
- [22] Lane A G. Laboratory scale anaerobic digestion of fruit and vegetable solid waste [J]. *Biomass*, 1984, 5(4): 245—259.
- [23] Haeis W L, Dague R R. Comparative performance of anaerobic filters at mesophilic and thermophilic temperature [J]. *Water Environment Resource*, 1993, 65(6): 764—771.
- [24] Calli B, Mertoglu B, Inanc B. Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors [J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(3-4): 1285—1292.

## EFFECT OF TEMPERATURE ON BIOGAS PRODUCTION FROM ANAEROBIC CO-DIGESTION OF VEGETABLE WASTE AND SWINE MANURE

Ren Haiwei<sup>1,3</sup>, Wang Yujie<sup>1,2</sup>, Li Jinping<sup>1,3</sup>, Xu Zhe<sup>1,3</sup>, Li Zhizhong<sup>2</sup>

(1. *China Western Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;*

2. *School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;*

3. *Gansu Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou 730050, China)*

**Abstract:** Batch anaerobic digestion experiments were used. The vegetable waste and the swine manure were mixed and fermented in mass ratio of 1:2 in 10 L reaction system to investigate the effects of temperature (20, 32, 37, 52 °C) on the gas production characteristics of the mixture. The results indicate that the mix fermentation system is stable at middle and high temperature condition (32, 37, 52 °C), but there is an acid inhibition phenomena during the later period of room temperature (20 °C) fermentation. The performance of producing biogas at 32 °C is optimal, the total biogas producing quantity is 4.65, 2.08 and 1.42 times of that at 20, 37, 52 °C, respectively. The pH value, VFAs and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration in the fermentation process are located in normal range. The experimental results in 3 m<sup>3</sup> household biogas digester show that the volume gas yield of mixed fermentation of vegetable and swine manure at 32 °C is 0.56 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), the average methane volume fraction is 54.83%, and the average daily gas production is 1.68 m<sup>3</sup>. The mix-ferment with vegetable and swine manure can not only maintain the stability of anaerobic fermentation system, but also can improve the biogas producing function, and can provide reference for the biogas-utilization of vegetable waste.

**Keywords:** anaerobic digestion; vegetable waste; temperature; swine manure; biogas