

# 不同固体浓度青贮玉米秸秆与牛粪混合发酵产沼气性能研究

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

(1. 兰州理工大学 生命科学与工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 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:** 为考察青贮秸秆与牛粪的混合厌氧发酵条件, 文章研究了 3 种不同总固体浓度(10%、12% 和 14%) 对二者中温发酵产沼气性能的影响, 并用修正 Gompertz 模型对其产气过程进行动力学拟合。结果表明, 总固体浓度为 12% 时的沼气产量和品质均高于另外 2 种固体浓度, 该条件下的发酵液 pH 值、VFAs、COD 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度变化有利于沼气发酵。用修正 Gompertz 模型能很好地拟合累积产甲烷量随时间的变化, 拟合得到 3 个试验组的最大产甲烷速率分别为 211.12、345.31 和 210.93  $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$ 。说明 TS 12% 时的青贮玉米秸秆与牛粪混合发酵产沼气效果最佳。

**关键词:** 青贮玉米秸; 牛粪; 混合发酵; 总固体浓度; 修正 Gompertz 模型

中图分类号: S216.4; TK6 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2017)01-0029-06

**Biogas Production of Maize Stalk Silages Mixed with Cattle Dung at Different Total Solid Concentrations / LI Zhi-zhong<sup>1</sup>, YAO Xing-quan<sup>1</sup>, REN Hai-wei<sup>1,2,3</sup>, WANG Yu-jie<sup>1</sup>, LI Jin-ping<sup>2,3</sup> / (1. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Gansu Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou 730050, China)**

**Abstract:** This study aimed to investigate the optimum fermentation condition for combined digestion of maize stalk silage (MSS) and cattle dung. Effects of different initial TS concentrations (10%, 12% and 14%) on the anaerobic co-digestion were evaluated. The experiment was carried out in 1.5 L batch digesters at temperature of 37°C for 62 days. The methane production data were fitted with the modified Gompertz model to assess the characteristics of the anaerobic digestions. The results showed that the TS concentration of 12% had a better biogas production than the other two TS concentration. Moreover, the modified Gompertz equation could fit well the change of the accumulative methane production with the fermentation time. Parameters of maximum methane yield, methane production rate and lag period could be important evaluation index for the mixed fermentation. The fitting of modified Gompertz model showed that the maximum methane production rate were 211.12  $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$ , 345.31  $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$  and 210.93  $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$  for initial TS concentration of 10%, 12% and 14%, respectively. So, the anaerobic co-digestion of maize stalk silages and cattle dung was favored with TS of 12%.

**Key words:** maize stalk silages (MSS); cattle dung; anaerobic co-digestion; total solid concentration (TS); modified Gompertz model

随着化石能源的枯竭和新能源需求的增加, 沼气开发因其既能提供清洁能源又能减少农牧废弃物引发的环境污染而成为生物能源的研究热点<sup>[1]</sup>。农作物秸秆是大中型沼气工程的重要原料, 青贮已成为克服秸秆季节性收获缺陷、保障沼气生产原料全年可持续供应的重要方式<sup>[2]</sup>。

诸多学者对青贮作物在沼气生产中的应用做了

广泛研究<sup>[3]</sup>。国外学者主要从作物收获时间、青贮过程、青贮添加剂、青贮周期、粒径大小等角度针对不同作物青贮后的消化产气性能进行了研究, 发现作物青贮后能明显提高沼气产量<sup>[4-6]</sup>。国内学者主要从厌氧消化参数、玉米品种及贮存方式等角度研究了全株玉米<sup>[7]</sup>、水葫芦和稻秸<sup>[8]</sup>及玉米秸秆<sup>[9]</sup>等作物青贮后的产沼气能力, 发现全株玉米青贮后的

收稿日期: 2016-01-22 修回日期: 2016-03-14

项目来源: 国家自然科学基金项目(51366009); 甘肃省自然科学基金项目(145RJZA064); 兰州市人才创新创业专项(2014-2-20)

作者简介: 李志忠(1963-)男, 汉族, 甘肃靖远人, 教授, 研究方向为生物质能源开发, E-mail: zzli2004@lut.cn

通信作者: 任海伟, E-mail: rhw52571119@163.com

甲烷产量明显高于鲜玉米,青贮玉米秸秆的总产气量和甲烷含量均优于干黄秸秆,水葫芦和稻秸混合青贮可提高甲烷浓度和累计甲烷产率。本课题组也发现青贮有利于提高玉米秸秆的沼气产量和品质<sup>[3]</sup>。然而,由于酸性青贮环境会生成有机酸,且秸秆组织结构和化学组分均发生变化,使其厌氧发酵的酸化时间较长,直接影响产甲烷菌活性和产气效果<sup>[3,10]</sup>。另一方面,秸秆自身的高C/N和营养不均衡等缺陷也影响产气性能<sup>[11]</sup>。因此,为克服青贮秸秆单一发酵系统稳定性差等缺陷,调节底物C/N和均衡营养结构,提高发酵缓冲能力,与畜禽粪便等高缓冲能物质进行混合消化是一种有效的改善途径<sup>[12-13]</sup>。然而,有关青贮秸秆与畜禽粪便混合发酵的研究报道很少。

在前期研究青贮玉米秸秆(MSS)与牛粪最佳混合比的基础上<sup>[3]</sup>,笔者采用批式发酵试验将发酵特性分析与动力学分析相结合,探索总固体浓度(TS)对二者混合消化产气特性的影响,并采用修正Gompertz模型对产甲烷曲线进行拟合<sup>[14]</sup>,通过考查产气性能和发酵液性质筛选适宜TS,为秸秆沼气工程设计提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

鲜玉米秸秆取自甘肃省陇西县,玉米全株摘取玉米穗后获得鲜秸秆,切断至1~2 cm后立即进行实验室常规青贮,青贮周期为240 d。鲜牛粪,取自兰州市七里河区农户。沼液取自甘肃荷斯坦奶牛繁育示范中心,取回后加入新鲜牛粪(质量比1:10)密封常温驯化15 d制得接种物。发酵原料特性如表1所示。

表1 厌氧消化原料的特性参数 (%)

原料	总固体 TS	挥发性固体 VS	碳氮比
青贮秸秆	19.82 ± 0.01	14.88 ± 0.00	32 ± 0.05
牛粪	20.06 ± 0.02	17.99 ± 0.01	24 ± 0.03
沼液接种物	2.09 ± 0.00	1.07 ± 0.00	—

### 1.2 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)。

### 1.3 厌氧消化试验设计

采用1.5 L发酵瓶进行批式厌氧消化,总填料质量为1000 g。设置TS分别为10%(I组),12%(II组)和14%(III组)3个梯度。牛粪和MSS的TS混合比为7:3<sup>[3]</sup>,具体底物添加量如表2所示,进料后补蒸馏水至1000 g。空白组只加牛粪和接种物,用于累计产气量的计算扣除。每个试验组3个重复,37℃中温发酵,反应瓶每天摇振3~5次,消化过程直至无气体产出为止。每天测定发酵液pH值、气体成分和产气量,并间隔4 d从取样口采样测定发酵液的化学需氧量(chemicals oxygen demand, COD)、挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)和铵态氮(ammonia nitrogen,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ )等指标。

表2 厌氧消化原料的添加方案

分 组	总固体浓度	青贮秸秆	牛粪
	%	g	g
I	10	145.29	338.95
II	12	175.31	408.99
III	14	205.33	479.03

### 1.4 分析方法

总固体(TS)和挥发性固体(volatile solids, VS)采用烘干法,其中TS105℃烘烤24 h,VS550℃灼烧4 h;沼气成分用Biogas Check测定;pH值用奥利龙PHS3C型pH计测定;VFAs测定用分光光度法;COD测定用重铬酸钾法; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 测定用苯酚次氯酸钠比色法。

### 1.5 动力学分析

将厌氧消化过程中累积产甲烷量作为考察对象,采用Gompertz方程对累积产甲烷量进行拟合,如公式(1)所示<sup>[14]</sup>。

$$y(t) = a \times \exp[-\exp(b - c \times t)] \quad (1)$$

使用origin9.0自定义函数拟合后,将参数a、b、c的值转为修正Gompertz方程中的参数值 $H_m$ 、 $R_m$ 、 $\lambda$ 。修正Gompertz方程如公式(2)所示。

$$y(t) = H_m \times \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_m \times e}{H_m}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (2)$$

式中: $H_m = a$ ,代表最大累积产甲烷量, mL;  $R_m = \frac{a \times c}{e}$ ,代表最大产甲烷速率( $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $\lambda = \frac{b-1}{c}$ ,代表反应滞后时间, d;  $t$ 代表厌氧消化进行的时间, d;  $e = \exp(1) \approx 2.71828$ ;  $R^2$ 代表拟合系

数<sup>[15]</sup>。

### 1.5 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 不同固体浓度时发酵液 pH 值的变化

由图 1 可以看出,整个发酵周期内 3 个试验组的 pH 值均在 6.5 ~ 7.5 范围浮动,总体呈现“下降—上升—下降—平稳—上升”的 W 型趋势。发酵初期(0 ~ 10 d),pH 值略有下降。由于秸秆在青贮过程中生成一定量的乳酸、乙酸等有机酸产物,进入消化体系后这些有机酸不断释放;同时发酵性细菌、产氢产乙酸菌和同型产乙酸菌的联合作用使原料中容易利用的基质成分被水解酸化<sup>[3]</sup>,导致 3 个试验组在 10 d 左右出现首次 pH 值小低谷(6.8 ~ 6.9)。随后 pH 值又逐渐上升至初始 pH 值 7.5 附近,但 15 d 后又开始下降,该阶段 pH 值下降的原因在于发酵前期水解后的有机物被产乙酸菌利用的速率大于乙酸被产甲烷菌利用的速率,导致有机酸累积<sup>[16]</sup>。

发酵中期(15 ~ 45 d),pH 值在 6.5 ~ 6.9 之间小幅波动。随着消化反应的进行,产甲烷菌不断代谢利用有机酸等中间产物生成甲烷,水解酸化反应和产甲烷反应达到适度平衡<sup>[16]</sup>。同时,水解过程产生大量的氨氮,当氨氮浓度达到一定时,溶液中存在  $\text{NH}_3 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{NH}_4^+$  的动态平衡,pH 值稳定在一定范围<sup>[3]</sup>。该阶段 I 组 pH 值最高且最稳定,II 组次之,III 组最低(约 6.5)。尽管发酵液偏酸,但产甲烷菌仍能适应环境并不断繁殖产气。到发酵后期(45 ~ 62 d),pH 值从 7.0 波动增加至 7.5。这是因为反应后

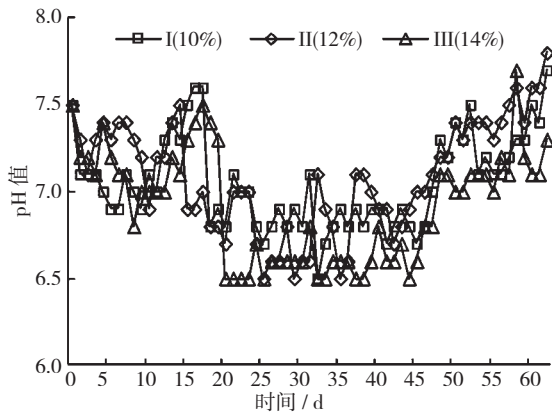


图 1 混合厌氧消化过程中 pH 值的变化

期原料中易消化组分被逐渐分解消耗,水解酸化进程放缓,而产甲烷菌的繁殖和活性依然较强,不断消耗有机酸使 pH 值升高<sup>[16]</sup>。

### 2.2 不同固体浓度时 VFAs 质量浓度的变化

由图 2 可知,VFAs 浓度呈先升高再降低,最后趋于平稳的趋势,这与厌氧发酵理论相吻合<sup>[16]</sup>。厌氧发酵初期,接种物本身含有丰富的营养物质,为适应环境快及代谢能力强的产酸菌提供了生长繁殖机会,原料中有机物被充分酸化降解,代谢产生了大量甲酸、乙酸和  $\text{H}^+$  等水溶性有机物,使产氢产酸菌的生长繁殖速度加快,VFAs 浓度不断增加并达到最高值<sup>[10]</sup>。但 3 个试验组 VFAs 到达峰值所需时间不同,II 组和 III 组产酸持续时间较长,在 10 和 14 d 升至最高值,峰值分别为  $42.23$  和  $46.35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,而 I 组于第 6 天达到小高峰  $20.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这主要与发酵底物浓度有关,TS 越高,可酸化降解的有机底物浓度越高,在相同接种量条件下产酸微生物繁殖越快,增殖越多,使得高 TS 组的酸化时间延长<sup>[8]</sup>,故 III 组 VFAs 峰值高于 II 组和 I 组。另外,VFAs 浓度的升高往往伴随 pH 值的下降,这点在 I 和 II 组中得到体现,但 III 组 10 ~ 14 d 时的 pH 值和 VFAs 浓度均处于上升态势,这可能是因为当 VFAs 处于较高浓度时 pH 值对 VFA 浓度的变化变得不敏感<sup>[17]</sup>,而且发酵液的 pH 值变化还与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NH}_3$ , 碱度,  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}^+$  等因素有关。

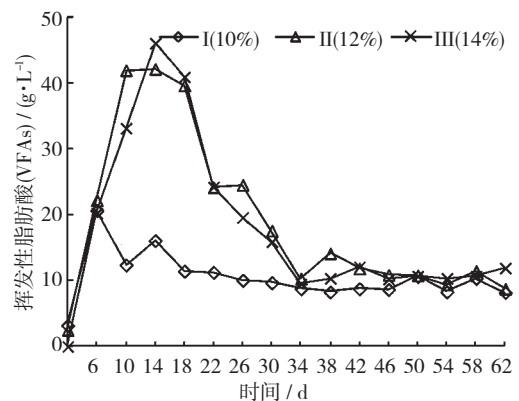


图 2 混合厌氧消化过程中 VFAs 的变化

发酵中后期,产氢产乙酸菌不断生长,利用 VFAs 产生乙酸,  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$ , 使 VFAs 浓度降低,并形成低的氧化还原电位,促进产甲烷菌生长;一段时间后,产氢产乙酸菌和产甲烷菌种群数量占优,大量利用 VFAs 转化生成甲烷和  $\text{CO}_2$ <sup>[9]</sup>。其中,II 组和 III 组 VFAs 浓度下降较快,说明该阶段体系中的产甲烷菌

活性较强;而低 TS 时的甲烷菌群活性恢复相对滞后, VFAs 浓度下降较慢。35 d 后,产甲烷菌大量繁殖并达到产酸与产甲烷平衡, VFAs 浓度稳定在较低水平  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这与 Wu<sup>[18]</sup>等结果一致。

### 2.3 不同固体浓度时发酵液 COD 质量浓度的变化

由图 3 可知, 3 个试验组的 COD 浓度均随消化时间的推移呈先增加后减小的趋势; TS 越高, COD 浓度升高的速度越快, 峰值越高。II 组和 III 组的 COD 浓度在第 10 天达到最高值, 分别为  $75.38$  和  $62.94 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 但 I 组增速较慢, 第 14 天达到最高值 ( $30.07 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 且峰值远小于 II 组和 III 组。一方面, 发酵液中 COD 浓度的高低与水溶性有机质的产生与消耗的平衡密切相关。在水解产酸阶段, 水溶性有机质的产生速率大于其消耗速率, COD 浓度上升; 当水解产酸阶段转为产甲烷阶段时, 水溶性有机质的产生速率小于其消耗速率, COD 浓度随之下降; 另一方面, TS 高低也会对 COD 浓度变化造成一定影响。TS 越高意味着可消化利用的底物越多, 有更多有机物被厌氧微生物菌群分解为产甲烷菌能代谢利用的小分子物质<sup>[19]</sup>。

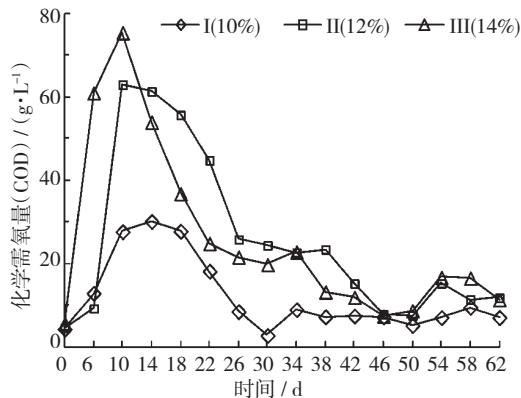


图 3 混合厌氧消化过程中 COD 的变化

### 2.4 不同固体浓度时发酵液铵态氮 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) 质量浓度的变化

由图 4 可知, 3 个试验组的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均呈现“上升—下降—上升—稳定”的变化趋势。发酵初期, 原料中含氮有机物水解导致  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度增加, 且 TS 越高, 产生  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的速度越快。I 组的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度增速最低, II 组和 III 组增速较快, 三者分别在 22, 14 和 10 d 达到首次高峰, 峰值分别为  $934.89$ ,  $1485.95$  和  $1288.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 说明  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的升高速率与 TS 有关。随着反应的进行, 由于产甲烷菌以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  作为生长代谢所需氮源大量

消耗导致其浓度逐渐下降; 当产甲烷菌繁殖到稳定期以后, 对氮源需求减少, 而此时底物中的含氮有机物水解反应仍在进行, 因此发酵后期的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度再次升高<sup>[20]</sup>, 此时 I 和 III 组的第 2 个峰值高于第 1 个, 而 II 组则相反。这可能是因为 TS 影响微生物数量和活性, 适宜 TS 有利于微生物数量的充分增殖, 使发酵后期微生物对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的消耗依然较高, 而过高或过低 TS 则因传质阻力或营养不足导致微生物数量较少和活性较低, 氮源消耗不旺盛<sup>[21]</sup>。另一方面, III 组自身较高的底物浓度也加剧了  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的累积, 使该组第 2 个峰值高于第 I 和 II 组。反应至发酵末期, 营养物质消耗减少, 使厌氧微生物菌群的增长遇到上升瓶颈,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的产生或消耗趋于稳定<sup>[20]</sup>。

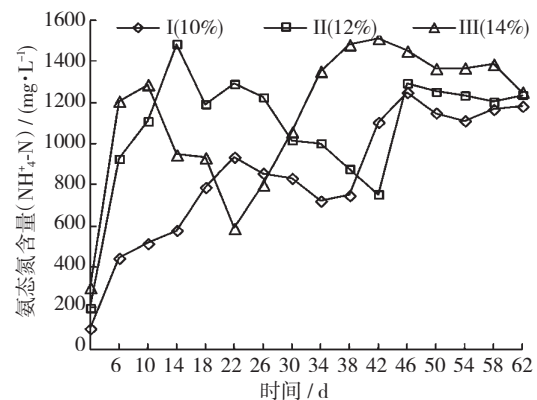


图 4 混合厌氧消化过程中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的变化

### 2.5 不同固体浓度时的混合发酵产气特性

由图 5 可知, 整个发酵周期内, 3 个试验组的累积产气量分别为  $16.438 \text{ L}$  (I 组),  $20.047 \text{ L}$  (II 组),  $14.633 \text{ L}$  (III 组), II 组产气量最高, 分别是 I 组和 III 组的 1.22 和 1.37 倍。图 6 显示 II 组的累积甲烷产量也高达  $8663 \text{ mL}$ , 远高于 I 组 ( $598 \text{ mL}$ ) 和 III 组 ( $5385 \text{ mL}$ )。一方面, 高浓度发酵料液需要的

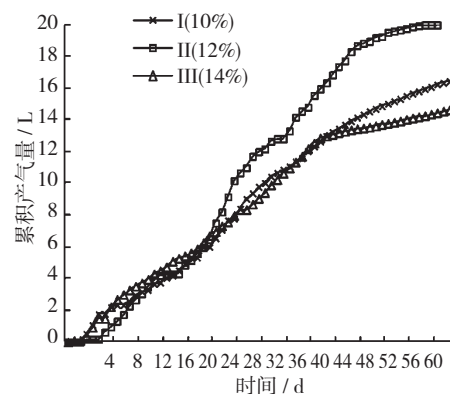


图 5 厌氧消化过程中的累积产气量变化

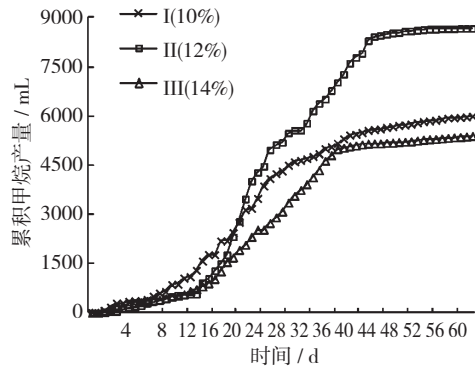


图6 厌氧消化过程中的累积甲烷产量变化

接种量较大,接种物不足导致产甲烷菌数量相对有限;另一方面,当 TS 较高时,由于料液水解速度高和传质不均匀等因素,使产甲烷菌活性和产气反应受到抑制<sup>[13]</sup>。宋籽霖<sup>[22]</sup>等亦认为发酵料液浓度过低或过高均不利于提高产气量。另外,Ⅲ组的 pH 值在发酵中期长时间处于 6.5~6.6(见图 1),略低于产甲烷菌适宜范围(6.8~7.2)。pH 值低于 6.6 会抑制产甲烷菌活性。说明适宜 TS 有利于促进产气量和产气品质提升。

从表 3 其他产气参数来看,Ⅲ组的产气特性最差,I 和 II 组的 TS 产气率和 VS 产气率差异不显著,但 II 组的 TS 产甲烷率和 VS 产甲烷率均显著高于 I 组和 III 组,说明 TS 12% 时的产气效果最佳,产气量也高于 Kalamaras<sup>[23]</sup>等报道的水飞蓟与牛粪混合消化的产气量(192 mL·g<sup>-1</sup>VS),但低于玉米、刺棘蓟和高粱与牛粪混合消化的产气量(267,308 和 241 mL·g<sup>-1</sup>VS),这可能是由于青贮原料纤维组分及发酵预处理条件不同所致<sup>[23]</sup>。

表 3 不同固体浓度时的混合发酵产气特性

项 目	I 组(10%)	II 组(12%)	III 组(14%)
日均产气量/mL	265.14 <sup>a</sup>	323.34 <sup>b</sup>	236.02 <sup>b</sup>
TS 产气率/(mL·g <sup>-1</sup> TS)	159.83 <sup>a</sup>	163.24 <sup>a</sup>	102.49 <sup>b</sup>
VS 产气率/(mL·g <sup>-1</sup> VS)	206.03 <sup>a</sup>	209.68 <sup>a</sup>	131.32 <sup>b</sup>
TS 产甲烷率/(mL·g <sup>-1</sup> TS)	58.23 <sup>a</sup>	70.54 <sup>b</sup>	37.72 <sup>c</sup>
VS 产甲烷率/(mL·g <sup>-1</sup> VS)	75.06 <sup>a</sup>	90.61 <sup>b</sup>	48.33 <sup>c</sup>

注: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)

### 2.6 产甲烷动力学分析

采用修正 Gompertz 模型对 3 个试验组累积产甲烷量随时间的变化进行拟合,发现 3 个试验组的决定系数 R<sup>2</sup> 均在 0.99 以上,说明可采用该模型对混合发酵过程进行动力学分析。3 个试验组的模型

参数如表 4 所示,I,II 和 III 组的滞后时间分别为 10.53d、15.88d 和 14.81d,II 组的 λ 显著大于另外 2 组,说明 II 组经历了厌氧发酵菌群的激烈调整,在形成了适合于青贮玉米秸秆与牛粪混合物的微生物群落后进入产甲烷高峰期,使 II 组获得最大产甲烷速率 345.3 mL·d<sup>-1</sup>。其次,II 组的 R<sub>m</sub> 较高,使其在进入产甲烷高峰期后很快就完成了产甲烷过程。

表 4 不同固体浓度下的产甲烷动力学参数

分 组	H <sub>m</sub> mL	R <sub>m</sub> (mL·d <sup>-1</sup> )	λ d	t <sub>m</sub> d	R <sup>2</sup>
I (10%)	6108.241	215.115	10.534	20.980	0.99686
II (12%)	9068.062	345.305	15.877	25.538	0.99518
III (14%)	5647.321	210.932	14.808	24.657	0.99224

### 3 结 论

(1) 青贮玉米秸秆与牛粪混合消化过程中,TS 为 12% 时的累积产气量和产甲烷量等参数均高于 TS 为 10% 和 TS 为 14% 时的参数,TS 为 12% 的产气性能最好。

(2) 采用修正 Gompertz 模型可以实现对不同总固体浓度下青贮玉米秸秆与牛粪混合物累积产甲烷量随时间变化的拟合,TS 为 12% 时二者混合发酵可以获得最大产甲烷速率 345.31 mL·d<sup>-1</sup>,最大累积产甲烷量为 9068.06 mL。

### 参 考 文 献:

- [1] 陈小华,朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J]. 农业工程学报,2007,23(3):279-283
- [2] Pakarinen A, Maijala P, Jaakkola S, et al. Evaluation of preservation methods for improving biogas production and enzymatic conversion yields of annual crops[J]. Biotechnology for Biofuels, 2011, 4(20): 1-13.
- [3] 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.
- [4] Herrmann C, Heiermann M, Idler C. Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(8): 5153-5161.
- [5] Herrmann C, Heiermann M, Idler C, et al. Particle size reduction during harvesting of crop feedstock for biogas production I: Effects on ensiling process and methane yields[J]. Bio Energy Research, 2012, 5(4): 926-

- 936.
- [6] Bárbara R, Charles J B, Heaven S. Biochemical methane potential of winter wheat (*Triticum aestivum*L.): Influence of growth stage and storage practice [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (21): 8179 – 8184.
- [7] Gao Ruifang, Yuan Xufeng, Zhu Wanbin, et al. Methane yield through anaerobic digestion for various maize varieties in China [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118(8): 611 – 614.
- [8] 夏益华. 预处理对水葫芦和稻秸厌氧消化产沼气性能的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] 井良霄. 干青玉米秸秆厌氧发酵特性与优化工艺研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [10] 段娜, 林聪, 韩芳, 等. 不同预处理方式对秸秆厌氧消化特性的影响[J]. *太阳能学报*, 2014, 35 (12): 2582 – 2587.
- [11] 汪国刚, 郑良灿, 刘庆玉. 沼气干式厌氧发酵技术研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2014, 34 (12): 48 – 52
- [12] Yangin Gomec C, Ozturk I. Effect of maize silage addition on biomethane recovery from mesophilic co-digestion of chicken and cattle manure to suppress ammonia inhibition [J]. *Energy Conversion Management*, 2013, 71(1): 92 – 100.
- [13] Hamelin L, Naroznova I, Wenzel H. Environmental consequences of different carbon alternatives for increased manure-based biogas [J]. *Applied Energy*, 2014, 114 (2): 774 – 782.
- [14] 李建昌, 孙可伟, 何娟, 等. 应用 Modified Gompertz 模型对城市生活垃圾沼气发酵的拟合研究[J]. *环境科学* 2011, 32(6): 1843 – 1850
- [15] 刘爽, 李文哲. 猪粪与马铃薯皮渣混合厌氧发酵产氢特性[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 197 – 202.
- [16] 周晓臣. 城镇有机垃圾厌氧发酵中有机酸及氨氮抑制效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006
- [17] 郭汝阳, 陈云敏, 李育超, 等. 考虑 pH 值和挥发性脂肪酸影响的填埋城市固废厌氧降解模型[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1): 147 – 156.
- [18] Wu Guangxue, Healy M G, Zhan Xinmin. Effect of the solid content on anaerobic digestion of meat and bone meal [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100 (19): 4326 – 4331.
- [19] 柳珊, 吴树彪, 张万钦, 等. 白腐真菌预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷影响实验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(S2): 124 – 129, 142
- [20] 李东, 叶景清, 孙永明, 等. 稻草与牛粪混合连续厌氧消化制备生物燃气研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 101 – 105, 100
- [21] 杜连柱, 杨继东, 张克强, 等. 厌氧消化过程氨抑制研究进展[J]. *可再生能源*, 2012, 30(4): 70 – 74
- [22] 宋籽霖, 李轶冰, 杨改河, 等. 温度及总固体浓度对粪秆混合发酵产气特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 260 – 265.
- [23] Kalamaras S D, Kotsopoulos T A. Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in South Europe [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 172 (2): 68 – 75.