

# 杂交狼尾草厌氧发酵的物质与能量转化率分析

甄峰, 孙永明, 孔晓英\*, 牛红志

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;  
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

**摘要:** 为了解厌氧发酵过程中的 C、N 元素流动状况以及物质和能量的转化利用效率, 以杂交狼尾草为原料, 采用中温 (35±1) °C 批次厌氧发酵工艺, 研究了杂交狼尾草厌氧发酵制备沼气的产气性能, 在此基础上结合物质流分析方法分析了发酵过程中 C、N 元素的分布情况以及物质与能量的转化率。研究结果表明: C/N 167 和 25 下, 杂交狼尾草鲜料的 VS (挥发性固体) 产气量分别为 280.02 和 242.33 mL/g, 其中 CH<sub>4</sub> 体积分数分别为 59.96% 和 61.46%; C/N 137 和 25 下, 青贮料的 VS 产气量分别为 327.02 和 295.43 mL/g, 其中 CH<sub>4</sub> 体积分数分别为 58.49% 和 61.05%; C 元素的流向分布: 沼气 33.1%, 发酵液 8.0%, 发酵渣 58.9%; N 元素主要流入剩余物中: 发酵液 69.4%, 发酵渣 30.7%。杂交狼尾草厌氧发酵制备沼气的物质转化率和能量转化率分别为 42.1% 和 33.1%。该研究为能源草本植物的资源管理和厌氧能源化利用提供了理论依据。

**关键词:** 甲烷; 发酵; 沼气; 杂交狼尾草; 物质流分析; 物质与能量转化率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.031

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-19-0236-06

甄峰, 孙永明, 孔晓英, 牛红志. 杂交狼尾草厌氧发酵的物质与能量转化率分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 236-241. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.031 http://www.tcsae.org

Zhen Feng, Sun Yongming, Kong Xiaoying, Niu Hongzhi. Material and energy conversion efficiency of anaerobic fermentation process of *Penisetum* hybrid for biogas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(19): 236 - 241. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.19.031 http://www.tcsae.org

## 0 引言

随着世界经济的快速发展, 能源危机不断加剧, 化石能源造成的环境污染日益加重, 寻找可再生能源植物替代能源的需求将越来越迫切<sup>[1-2]</sup>。能源草作为第二代能源作物, 因其具有光合作用强、生物量产出高、耐酸碱环境、有效能源组分含量高特点而成为最有应用前景的替代能源原料之一<sup>[3-4]</sup>, 在世界各国的能源发展计划中占据重要部分。中国生物质资源储量非常丰富, 未来 10 a 内可开发的各类生物质资源总量相当于 1.34×10<sup>8</sup> t 标准煤<sup>[5]</sup>。利用边际土地资源种植能源草本植物, 不仅有利于改善生态环境, 而且对维护粮食安全也具有重要意义。

21 世纪以来, 中国对沼气产业的扶持力度显著增强, 在《可再生能源中长期发展规划》中提出了 2020 年全国沼气年利用量达到 4.4×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup> 的发展目标<sup>[6]</sup>。能源草青贮后通过厌氧发酵制备的沼气, 其 CH<sub>4</sub> 体积分数可达到 70%~80%<sup>[7]</sup>, 微量金属元素的添加对新鲜草和青贮草的厌氧发酵产气性能也有显著影响<sup>[8]</sup>。能源草单独发

酵、混合发酵以及预处理后发酵的产气效果均有报道研究<sup>[9-15]</sup>。目前能源草厌氧发酵研究主要在厌氧发酵工艺及产气潜力方面, 对于沼气制备过程物质和能量的流向分布研究报道偏少, 而且缺乏统一的研究方法。生物燃料生产过程必须考虑能源投入产出比, 以使原料转化效益最大化, 物质利用和能源转化率是影响生物质能源工业化的关键。

杂交狼尾草 (hybrid *Penisetum*) 在目前已研究的能源草本植物中具有最高的生物质量, 在生长周期比林木短的情况下, 可以提供木本植物 2 倍以上的生物产量, 成本亦没林木的高<sup>[16]</sup>。北京地区的干物质产量能够达到 40.14~48.54 t/hm<sup>2</sup>, 明显高于相同生长环境条件下的柳枝稷、荻和芦竹<sup>[17]</sup>。以杂交狼尾草为原料, 采用批次中温 (35±1) °C 厌氧发酵工艺 (mesophilic anaerobic digestion, MAD), 研究不同 C/N 比例的鲜料和青贮料厌氧发酵的产气性能, 应用物质流分析方法建立杂交狼尾草 MAD 制备沼气过程的物质流分析模型, 评价原料的总物质质量、C 和 N 元素以及能量的流向分布。

本文采用中温厌氧发酵工艺, 研究杂交狼尾草制备沼气过程中的产气特性, 并结合物质流分析方法研究厌氧发酵过程中的 C、N 元素流动状况以及物质和能量的转化利用效率, 为能源植物的厌氧转化利用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验原料

试验用杂交狼尾草取自广州市增城区能源草种植基地, 刈割后制成鲜料和青贮料 2 种发酵原料: 鲜料切碎

收稿日期: 2017-05-03 修订日期: 2017-09-04

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAD21B03); 中国科学院技术服务网络计划 (KFJ-Ew-STS-138); 广东省科技计划项目 (2015B020215011); 广州市科技计划项目 (201508020098); 中国科学院可再生能源重点实验室项目 (Y707j21001)

作者简介: 甄峰, 男, 山东德州人, 工程师, 主要从事生物质生化转化研究。Email: zhenfeng@ms.giec.ac.cn

\*通信作者: 孔晓英, 女, 四川人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事生物质能源化利用研究。Email: kongxy@ms.giec.ac.cn

至 2 cm 左右, 保存于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  备用; 鲜料切碎至 2 cm 左右, 于室温下青贮 60 d, 然后保存于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  作为青贮料备用, 试验过程中按需取出, 粉碎过筛 (20 目) 作为发酵原料。

鲜料和青贮料的理化性质见表 1, 工业、元素及物料分析显示原料青贮前后理化性质变化不显著, 青贮后 N 元素和半纤维素的相对含量略有上升。

表 1 发酵原料的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of raw materials for fermentation

原料 Materials	工业分析 Industry analysis			元素分析 Elemental analysis					物料分析 Material analysis			
	热值 Calorific value/(kJ·g <sup>-1</sup> )	TS/%	VS/%	N/%	C/%	H/%	S/%	C/N	纤维素 Cellulose/%	半纤维素 Hemicellulose/%	木质素 Lignin/%	灰分 Ash/%
鲜料 Fresh material	17.6	37.29	93.37	0.27	45.2	6.29	0.06	167	43.46	21.1	22.44	1.96
青贮料 Silage	17.6	36.61	95.07	0.33	44.46	6.17	0.10	137	42.61	24.72	22.08	1.59

发酵接种物为本实验室长期驯化的中温 ( $35\pm 1$ )  $^{\circ}\text{C}$  厌氧发酵产甲烷菌种(沼液), pH 值 7.51、氨氮 285 mg/L、TS (总固体) 质量分数 1.18%、VS/TS 为 54.39%。C/N 调节剂为尿素  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (纯度  $\geq 99\%$ ) 和碳酸氢铵  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  (纯度  $\geq 99\%$ );  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  (纯度  $\geq 99\%$ ) 同时作为缓冲剂使用。

### 1.2 试验装置及操作

试验装置见图 1, 2 500 mL 厌氧反应器, 置于  $(35\pm 1)^{\circ}\text{C}$  的水浴锅中, 侧壁上有 2 个出口, 上出口为取气样口, 下出口为取液样口, 上部连接集气瓶, 集气瓶后连通集液瓶, 通过排饱和和盐水法测定沼气产量。添加 2.5% 的  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  (杂交狼尾草原料总质量计) 作为 pH 值调节剂, 调节发酵液初始 pH 值在 7.2 以上。充入高纯  $\text{N}_2$  排出反应器顶部的空气。试验期间每天手动搅拌 2 次。以 VS 日产气量持续 5 d 低于 1 mL/(g·d) 为结束试验的指标依据, 共运行 50 d。发酵剩余物称量后过滤, 滤渣  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干用于沼渣 (biogas residue) 分析, 滤液  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  保存用于沼液 (biogas slurry) 分析。



图 1 厌氧发酵试验装置图

Fig.1 Anaerobic fermentation unit of LAB-2 500 mL

### 1.3 数据测试与分析方法

TS、VS 采用电热鼓风干燥箱、箱式电阻炉, 并根据标准方法测定<sup>[18]</sup>。固体中的 C、H、N 和 S 元素含量采用 Vario EL cube 元素分析仪测定<sup>[19]</sup>; 液体中的总碳 (total carbon, TC)、总无机碳 (total inorganic carbon, TIC) 和总氮 (total nitrogen, TN) 采用 Vario TOC 分析仪测定; 纤维素 (cellulose, CL)、半纤维素 (hemicellulose, HCL) 和木质素 (lignin, LG) 测定参考美国可再生能源实验室标准测定方法 (NREL, LAP)<sup>[20-21]</sup>。热值 (calorific value, CV) 由量热仪 C2000 (德国 IKA@公司) 测定。

沼液中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  等气体含量由岛津 GC2014 型高效气相色谱测定, TCD 检测器, Porapak Q 色谱柱, 载气为 Ar, 柱箱  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 检测器  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保留时间 5 min。标准气体  $\text{N}_2$  5%、 $\text{CH}_4$  60%、 $\text{CO}_2$  35%。

分析原料中总物质量和 C、N 元素以及能量在整个系

统中的流向分布。物质流分析方法参见《Practical Handbook of Material Flow Analysis》<sup>[22]</sup>, 物质流分析系统模型应用 Stan2.5 软件建立, 数据应用 IAL-IMPL2013 算法优化<sup>[23]</sup>, 物质流分析结果应用 e!Sankey 软件绘图呈现。

### 1.4 试验设计

发酵原料分为鲜料和青贮料 2 类, C/N 分未调节和人为调节 2 种, 反应器容积 2 500 mL, 共包括 4 组试验: 鲜料未调节 C/N (鲜料 C/N=167), 鲜料调节 C/N (鲜料 C/N=25), 青贮料未调节 C/N (青贮 C/N=137) 和青贮料调节 C/N (青贮 C/N=25)。每组试验设置 2 个平行。VS<sub>added</sub> 负荷为 3.0% (包括原料、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  和  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  的 VS), 接种物的体积为 1 900 mL, 其他参数具体试验设计见表 2。

表 2 试验反应物配比表

Table 2 Proportion of various substances in anaerobic fermentation units

原料 Raw material	C/N	加入量 Addition amount/g	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2/\text{g}$	$\text{NH}_4\text{HCO}_3/\text{g}$
鲜料 Fresh material	167	174.07	-	-
青贮 Silage	137	172.52	-	4.25
青贮 Silage	25	169.72	1.869 5	4.25

注:  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  调节 C/N;  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  调节发酵液的 pH 值。

Note:  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  regulates C/N;  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  regulates pH value of fermentation broth.

## 2 结果与分析

### 2.1 厌氧发酵系统的性能分析

厌氧发酵前后 TS、VS、纤维素、半纤维素、木质素、C 和 N 元素的去除率情况见表 3。厌氧发酵过程中, 纤维素和半纤维素的降解是厌氧消化的限速步骤, 而降解速率是影响厌氧消化过程生物质转化效率的重要因素<sup>[24-25]</sup>。发酵系统中 VS 去除率在 51.68%~57.56% 之间, C 元素的去除率在 16.90%~34.11% 之间, 纤维素的去除率在 36.51%~56.78% 之间, 半纤维素的去除率在 34.12%~47.69% 之间。

沼气和  $\text{CH}_4$  的制备状况分别见图 2 和表 4。鲜料 (C/N=167) 和青贮料 (C/N=137) 厌氧发酵的 VS 累积产气量分别为 280.02 和 327.02 mL/g, VS 日产气量最大值分别为 19.59 和 42.12 mL/(g·d), 沼液中  $\text{CH}_4$  体积分数分别为 59.96% 和 58.49%, 相比鲜料, 青贮料的沼气及  $\text{CH}_4$  的 VS 累积产气量分别提高了 16.78% 和 13.92%。鲜料 (C/N=25) 和青贮料 (C/N=25) 厌氧发酵的 VS 累积产气量分别为 242.33 和 295.43 mL/g, 最大 VS 日产气量分别为 24.33 和 37.18 mL/(g·d), 沼液中  $\text{CH}_4$  体积分数分

别为 61.46% 和 61.05%，相比鲜料，青贮料的沼气及  $\text{CH}_4$  的 VS 累积产量分别提高了 21.91% 和 21.10%。青贮过程能够预降解 VS，原料厌氧发酵的产气效果得到明显提升。

表 3 发酵前后不同物质的去除率

Table 3 Removal rates of different substances in anaerobic fermentation process

原料 Raw materials	TS/%	VS/%	C/%	N/%	纤维素 Cellulose/%	半纤维素 Hemicellulose/%	木质素 Lignin/%
鲜料 Fresh material C/N=25	49.00	54.78	24.75	-26.19	43.29	34.12	1.63
鲜料 Fresh material C/N=167	53.34	57.56	34.11	-1.17	56.78	47.69	8.51
青贮 Silage C/N=25	45.05	51.68	16.90	-9.22	36.51	37.02	-13.91
青贮 Silage C/N=137	47.13	54.05	20.75	-14.05	47.60	46.05	-14.97

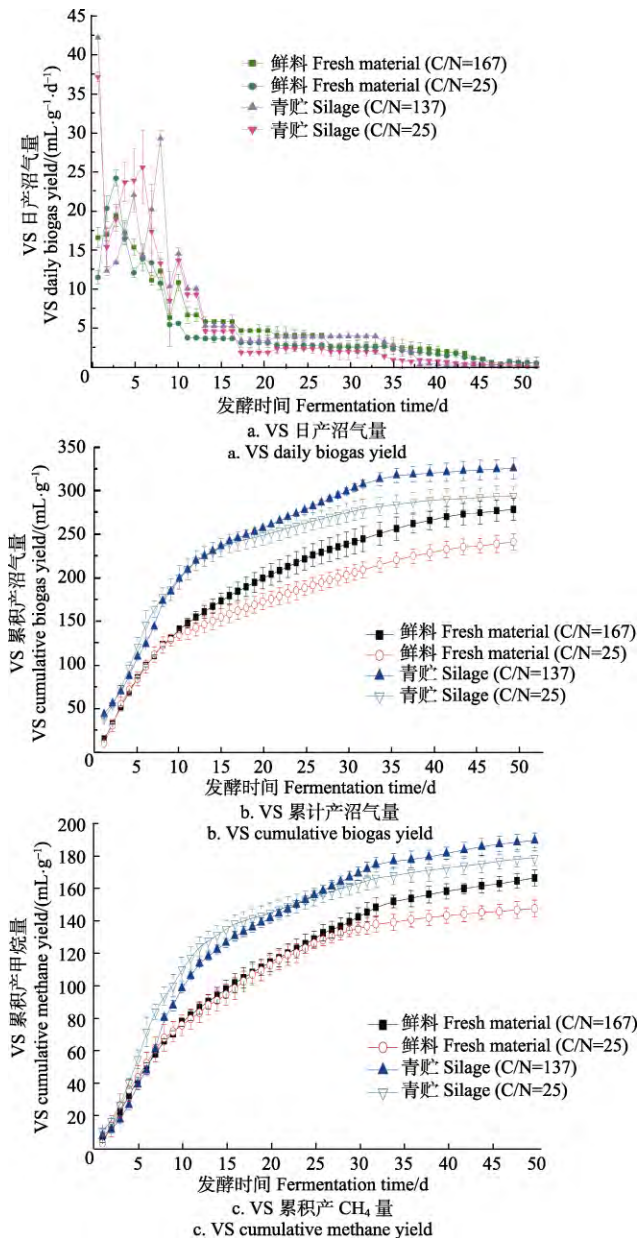


图 2 LAB-2 500 mL 反应器厌氧发酵产气情况

Fig.2 Biogas and  $\text{CH}_4$  production in LAB-2 500 mL reactor

表 4 杂交狼尾草制备沼气的产气结果

Table 4 Gas production of energy grass producing biogas

原料 Raw materials	BP/( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	MDBP/( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )	MP/( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	MDMP/( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )	MP/BP/%
鲜料 Fresh material C/N=167	280.02	19.59	167.91	10.66	59.96
鲜料 Fresh material C/N=25	242.33	24.33	148.94	12.79	61.46
青贮 Silage C/N=137	327.02	42.12	191.29	19.32	58.49
青贮 Silage C/N=25	295.43	37.18	180.37	17.01	61.05

注: BP, 沼气产量; MDBP, 沼气的最大日产气量; MP, 甲烷产量; MDMP, 最大日产甲烷量; MP/BP, 沼气中甲烷体积分数。

Note: BP, biogas production; MDBP, max daily biogas production; MP, methane production; MDMP, max daily methane production; MP/BP, methane content in biogas.

在 C/N 调节对厌氧系统的影响效果方面, 对比以上数据, 鲜料 (C/N=167) 的沼气及  $\text{CH}_4$  的 VS 累积产量较鲜料 (C/N=25) 分别高出 15.55% 和 12.74%; 青贮 (C/N=137) 的沼气及  $\text{CH}_4$  的 VS 累积产量较青贮 (C/N=25) 分别高出 10.69% 和 6.05%。本试验过程 C/N 调节不但没有提高杂交狼尾草的产气率, 反而有所降低, 原因可能是木质纤维素等不易被厌氧微生物代谢利用的碳源物质中的 C 元素, 参与到 C/N 计算中, 导致评估物料厌氧发酵特性的 C/N 结果出现偏差, 而以此为依据进行人为调节, 就会加入过量 N 源, 甚至使  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度进入抑制厌氧系统的范围<sup>[26-28]</sup>。

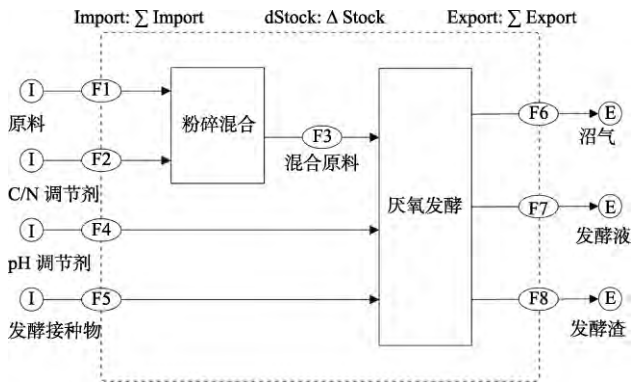
## 2.2 物质流分析

### 2.2.1 沼气制备过程的物质流分析模型

以杂交狼尾草青贮料 (C/N=137) 在 LAB-2 500 mL 反应器中的发酵过程作为模型, 建立开放型的物质流分析系统 (MFA System), 如图 3 所示, 系统空间边界 (system space boundary) 包含粉碎混合和厌氧发酵 2 个过程 (process), 系统时间边界 (system time boundary) 选定为一个发酵试验周期 (cycle, cy), 系统涉及 8 条物质流 (flow)。系统输入有 4 条物质流 (goods flow): 原料、C/N 调节剂、pH 值调节剂和发酵接种物作为输入流 (import flow); 系统输出有 3 条物质流: 沼气、发酵液和发酵渣作为输出流 (export flow); 系统内部有一条物质流: 混合原料即作为粉碎混合过程的流出流 (output flow), 又作为厌氧发酵过程的流入流 (input flow)。根据建立的物质流分析模型, 对能源草厌氧发酵制备沼气的物质和能量流动分布进行分析<sup>[29]</sup>。

### 2.2.2 沼气制备过程的物质流动分析

能源草厌氧发酵过程的物质流动分析对象包括系统内的总物质及 C、N 元素流。青贮原料 (C/N=137) 的物质流动分析数据见表 5。数据输入建立的物质流分析模型 (见图 3) 中, 经过 95% 置信优化<sup>[30]</sup> 计算得到物质流分析结果见图 4。接种物和发酵剩余物的密度 ( $\rho_{\text{liquid}}$ ) 近似为 1.05 g/mL, 沼气的密度 ( $\rho_{\text{biogas}}$ ) 按气体成分  $\text{CH}_4$  61.1% 和  $\text{CO}_2$  38.9% 推算为 1.21 g/L。



注: Import:  $\sum$  Import 为总输入流; Export:  $\sum$  Export 为总输出流; dStock:  $\Delta$ Stock 为存量流: 总输入流与总输出流之差; I, 输入; E, 输出; F1-F8, 物质流 1-8。

Note: Import:  $\sum$  Import is total import flow; Export:  $\sum$  Export is total export flow; dStock:  $\Delta$ Stock is stock flow: the difference between the total import flow and the total export flow: I, Import; E, Export; F1-F8, Flow 1-8.

图 3 杂交狼尾草批式中温厌氧发酵制备沼气物质流分析模型  
Fig.3 MFA model of energy grass producing biogas by mesophilic anaerobic digestion

表 5 能源草厌氧发酵过程的物质流动分析数据表

Table 5 Data of substance flow analysis for mesophilic anaerobic digestion of energy grass

流向 Flow	总物质 Total materials	总物质流量 Total material flow/ (g·cy <sup>-1</sup> )	C,N 质量分数 C, N element content/(g·g <sup>-1</sup> )		C,N 元素流量 C, N element flow/(g·cy <sup>-1</sup> )	
			C	N	C	N
输入 Import	原料	172.5	0.162 77	0.001 21	28.077	0.208 4
	C/N 调节剂	0	0.171 43	0.400 00	0	0
	发酵接种物	199.5	0.001 01	0.000 67	2.004 5	1.349 0
	pH 值调节剂	4.250	0.153 85	0.179 49	0.653 9	0.762 8
内部 Stock	粉碎原料	172.5	0.162 77	0.001 21	28.077	0.208 4
	沼气	26.685	0.434 24	/	11.588	/
输出 Export	发酵液	210.8	0.001 25	0.000 89	2.630 0	1.867 1
	发酵渣	48.079	0.451 90	0.016 20	21.727	0.778 9

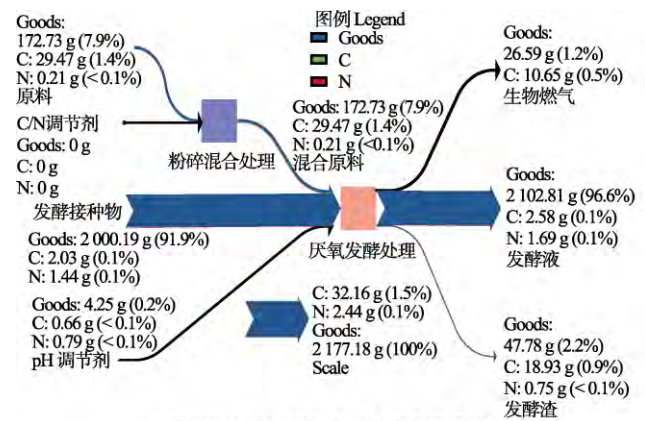
注: cy, 发酵试验周期; C(N)含量=  $TC(TN)/\rho_{liquid}$ ;  $m_{biogas} = TV_{biogas} \times \rho_{biogas}$ , C 含量=  $M_c/V_m \times \rho_{biogas}$ ,  $V_m=22.4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $M_c=12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 沼气的 N 元素含量忽略; 元素流量=总物质流量×元素含量。

Note: cy, cycle; C(N) content=  $TC(TN)/\rho_{liquid}$ ;  $m_{biogas} = TV_{biogas} \times \rho_{biogas}$ , C content=  $M_c/(V_m \times \rho_{biogas})$ ,  $V_m=22.4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $M_c=12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , Biogas N element content ignored; Element flow = total material flow × element content.

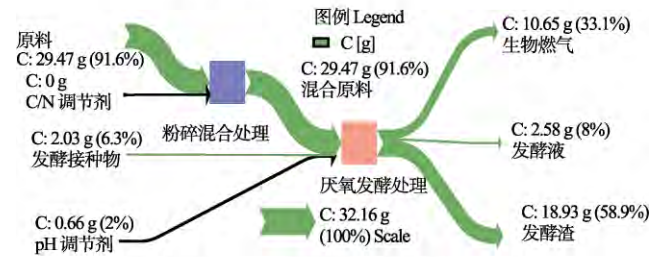
能源草厌氧发酵制备沼气过程的物质流动分析结果: 1) 原料约 42.1% 物质降解转化为沼气。2) 原料中 C 元素有 33.1% 以  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的形式流入沼气, 其余流入发酵剩余物中: 发酵液 8.0%, 发酵渣 58.9%。3) 原料中 N 元素主要流入剩余物中: 发酵液 69.4%, 发酵渣 30.7%。能源草原料厌氧发酵制备沼气的物质转化率较低, 原料中超过 60% 的 C 和 80% 的 N 仍停留在发酵剩余物中, 如何合理利用这部分资源是进一步提高能源草沼气工程资源利用效率和经济效益的重要手段。

### 2.3 沼气制备过程的能量流动分析

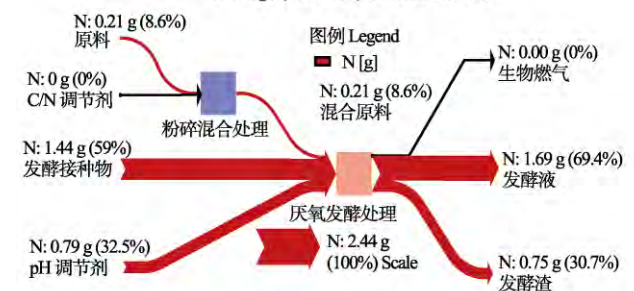
本研究的物质流分析是基于试验数据得出, 考虑到电能和热能统计存在较大误差, 因此系统的能量流动分析仅以各物质蕴含的化学能为依据, 单位物质能量以物质干基热值计算。能源草厌氧发酵制备沼气的能量流动分析数据见表 6, 接种物和发酵液中的液体部分能量不计, 并假设固体部分热值相同且等于沼渣的热值, 数据输入物质流分析模型, 经 95% 优化计算得能量流分析结果见图 5。



a. 青贮原料 (C/N=137) 的物质流分析: 物质  
a. Silage (C/N=137) material flow: Mass



b. 青贮原料 (C/N=137) 的物质流分析: 碳元素  
b. Silage (C/N=137) material flow: C



c. 青贮原料 (C/N=137) 的物质流分析: 氮元素  
c. Silage (C/N=137) material flow: N

图 4 能源草批式中温厌氧发酵过程的物质流动分析结果  
Fig.4 Sankey diagram of substance flow analysis for mesophilic anaerobic digestion

表 6 能源草厌氧发酵过程的能量流动分析

Table 6 Data of energy flow analysis for mesophilic anaerobic digestion of energy grass

流向 Flow	总物质 Total material	总物质流量 Total material flow/(g·cy <sup>-1</sup> )	TS/ %	能量含量 Energy content/(kJ·g <sup>-1</sup> )	能量流量 Energy Flow/(kJ·cy <sup>-1</sup> )
输入 Enter	原料	172.5	36.31	17.6	1 102.4
	C/N 调节剂	0	100	0	0
	发酵接种物	1 995	1.18	16.63	391.49
	pH 值调节剂	4.250	100	0	0
内部 Internal	粉碎原料	172.5	36.50	17.6	1 108.1
	沼气	26.685	100	17.03	454.51
输出 Output	发酵液	2108	0.22	16.63	77.123
	发酵渣	48.079	100	16.63	799.55

注: 假设接种物和发酵液的总固体热值与沼渣相同; 能量含量为 TS 的热值; 能量流量=总物质流量×TS×能量含量。

Note: Assume that the total solid calorific value of the inoculum and the fermentation broth is the same as that of the biogas residue; The energy content is the calorific value of TS; Energy flow = Total material flow × TS × Energy content.

能量流动分析结果显示: 能源草原料中的能量有33.1%进入沼气中, 原料61.3%能量保留在发酵渣中。可见, 杂交狼尾草中温厌氧发酵制备沼气过程中, 需要注意发酵渣中能量的二次转化利用, 提高资源的能量转化率。

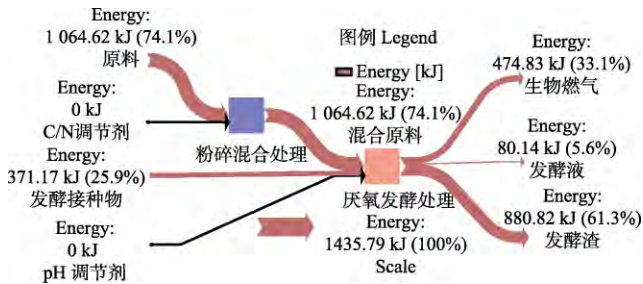


图5 能源草批式中温厌氧发酵过程的能量流动分析结果

Fig.5 Sankey diagram of energy flow analysis for mesophilic anaerobic digestion of energy grass

### 3 结论

本研究基于杂交狼尾草的厌氧发酵试验, 通过对转化过程的物质流和能量流分析, 得到以下结论:

1) 厌氧发酵前后有机物(VS)的去除率在51.68%~57.56%之间, 去除的成分主要是纤维素和半纤维素。因此, 规模化发展能源草生物燃气工程时, 应选择能源草中纤维素和半纤维素含量相对较高的生长阶段进行刈割; 同时, 对沼渣中难降解有机物如木质素进行高值化利用, 以提升能源草生物燃气工程的综合效益;

2) 杂交狼尾草鲜料(C/N=167)和青贮料(C/N=137)厌氧发酵的VS累积产气量分别为280.02和327.02 mL/g, 青贮过程可预降解VS, 从而提高原料的累积产气量, 但对沼气中CH<sub>4</sub>的含量影响不大。厌氧发酵体系的C/N调至25, VS累积产气量有所下降, 原因可能是木质纤维素等不易被厌氧微生物代谢利用的碳源物质中的C元素, 参与到C/N计算中, 导致评估物料厌氧发酵特性的C/N结果出现偏差, 而以此为依据进行人为调节, 就会加入过量N源, 甚至使NH<sub>4</sub>-N浓度进入抑制厌氧系统的范围;

3) 对转化过程的物质流分析结果为: 原料约42.1%物质降解转化为沼气; C元素的流向分布: 沼气33.1%, 发酵液8.0%, 发酵渣58.9%; N元素主要流入剩余物中: 发酵液69.4%, 发酵渣30.7%; 能量有33.1%进入沼气中, 61.3%保留在发酵渣中。能源草厌氧发酵制备沼气的物质转化率偏低, 原料中超过60% C、80% N的资源以及60%的能源仍留在剩余物中, 进一步合理开发利用发酵液中的N和发酵渣中的C, 是进一步提高能源草沼气工程资源利用效率和经济效益的重要手段。

#### [参 考 文 献]

[1] 娄喜艳, 丁锦平. 生物质能源发展现状及应用前景[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2017, 29(2): 12-14.  
Lou Xiyan, Ding Jinping. Biomass energy development status and application prospects[J]. Chinese Agricultural Digest-Agricultural Engineering, 2017, 29(2): 12-14. (in Chinese with English abstract)

[2] 袁振宏, 雷廷宙, 庄新姝, 等. 我国生物质能研究现状及未来发展趋势分析[J]. 太阳能, 2017(2): 12-19.  
Yuan Zhenhong, Lei Tingzhou, Zhuang Xinshu, et al. Characteristics and future development trend of biomass energy in China[J]. Solar Energy, 2017(2): 12-19. (in Chinese with English abstract)

[3] 温海峰, 范希峰, 朱毅, 等. 杂交狼尾草作为能源植物的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 99-104.  
Wen Haifeng, Fan Xifeng, Zhu Yi, et al. Progress of hybrid Pennisetum as an energy plant[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(3): 99-104. (in Chinese with English abstract)

[4] 石元春. 生物质能源主导论: 为编制国家“十二五”规划建言献策[J]. 能源与节能, 2011(1): 1-7.  
Shi Yuanchun. Biomass Energy dominant theory for the preparation of the national “Twelfth Five-Year Plan” suggestions[J]. Energy and Energy Conservation, 2011(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[5] 刘卫东. 我国低碳经济发展框架与科学基础[M]. 北京: 商务印书馆, 2010.

[6] 侯新村, 范希峰, 朱毅, 等. 能源草沼气发酵应用潜力及应用前景[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014(3): 426-434.  
Hou Xincun, Fan Xifeng, Zhu Yi, et al. Application potential and application prospect of biogas fermentation in energy plants[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2014(3): 426-434. (in Chinese with English abstract)

[7] Abu-Dahrieh J, Orozco A, Groom E, et al. Batch and continuous biogas production from grass silage liquor[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(23): 10922-10928.

[8] Brule M, Bolduan R, Seidelt S, et al. Modified batch anaerobic digestion assay for testing efficiencies of trace metal additives to enhance methane production of energy crops[J]. Environmental Technology, 2013, 34(13/14): 2047-2058.

[9] 李连华, 孙永明, 袁振宏, 等. 能源草单独厌氧发酵产气性能研究[J]. 中国沼气, 2014, 32(1): 18-22.  
Li Lianhua, Sun Yongming, Yuan Zhenhong, et al. Mono-digestion of different energy grass and biogas Production[J]. China Biogas, 2014, 32(1): 18-22. (in Chinese with English abstract)

[10] 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 Guangyin, Zheng Zheng, Zou Xingxing, 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 (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 179-183. (in Chinese with English abstract)

[11] 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.  
Song Zilin, Li Yibing, Yang Gaihe, et al. Effect of total solid concentration and temperature on biogas yields of mixture of chicken manure and corn straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 260-265. (in Chinese with English abstract)

[12] 李连华, 孙永明, 丁翠花, 等. 预处理方式对多年生王草厌氧消化性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 278-282.  
Li Lianhua, Sun Yongming, Ding Cuihua, et al. Effect of pretreatment methods on biogas production from anaerobic digested King grass[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 278-282. (in Chinese with English abstract)

[13] 张毅, 孔晓英, 李连华, 等. 能源草厌氧发酵产气性能与动力学分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 191-196.  
Zhang Yi, Kong Xiaoying, Li Lianhua, et al. Biogas production performance and dynamics of anaerobic digestion of different energy grasses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 191-196. (in Chinese with English abstract)

[14] 汪辉, 周禾, 高凤芹, 等. 能源草的研究与应用进展[J]. 草业与畜牧, 2013(1): 50-53.  
Wang Hui, Zhou He, Gao Fengqin, et al. Progress in research and application of energy herbs[J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2013(1): 50-53. (in Chinese with English abstract)

[15] 汪辉, 周禾, 高凤芹, 等. 能源草发酵产沼气的研究进展[J].

- 山东农业科学, 2014(3): 135—139.  
Wang Hui, Zhou He, Gao Fengqin, et al. Research progress of biogas production by energy grass fermentation[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014(3): 135—139. (in Chinese with English abstract)
- [16] 尹俊, 张美艳. 我国南方草地能源草固 C 潜能初探[J]. 草业与畜牧, 2013(5): 43—49.  
Yin Jun, Zhang Meiyun. Study on C potential of grassland in South China[J]. Science and Animal Husbandry, 2013(5): 43—49. (in Chinese with English abstract)
- [17] 范希峰, 侯新村, 朱毅, 等. 杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 48—52.  
Fan Xifeng, Hou Xincun, Zhu Yi, et al. as the yield and quality of hybrid pennisetum[J]. Characteristics of Energy Plant Chinese Agrestia Sinica, 2012, 34(1): 48—52. (in Chinese with English abstract)
- [18] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] 孙琪娟, 徐军礼, 孙长顺. 元素分析仪法测定氧含量的研究[J]. 当代化工, 2015(10): 2503—2505.  
Sun Qijuan, Xu Junli, Sun Changshun. Study on the determination of oxygen content by elemental analyzer[J]. Chemical Engineering, 2015(10): 2503—2505. (in Chinese with English abstract)
- [20] Li Lianhua, Li Dong, Sun Yongming, et al. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35: 7261—7266.
- [21] Yu Qiang, ZhuangXinshu, Lü Shuangliang. Liquid hot water pretreatment of sugarcane bagasse and its comparison with chemical pretreatment methdes for the sugar recovery and structural hanges[J]. Bioenergy Research, 2013, 129: 592—598.
- [22] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook for Material Flow Analysis[M]. Boca Raton Fla, London: CRC, 2004.
- [23] Elisa A, Alberto M, Mikael E O, et al. Quantification of the resource recovery potential of municipal solid waste incineration bottom ashes[J]. Waste Management, 2014, 34: 1627—1636.
- [24] 王明, 李文哲, 殷丽丽, 等. 高固体含量进料提高餐厨废弃物连续厌氧发酵性能[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 283—287.  
Wang Ming, Li Wenzhe, Yin Lili, et al. High solid concentration feedstock improving performance of continuous anaerobic digestion of food waste[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 283—287. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨富裕, 吴春会, 周禾, 等. 一种提高能源草厌氧发酵产沼气效能的方法: CN105177051A[P]. 2015.
- [26] Rajinikanth Rajagopal, Daniel I Massé, Gursharan Singh. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia[J]. Bioresource Technology, 2013, 143: 632—641.
- [27] Wang Ming, Li Wenzhe, Li Pengfei. An alternative parameter to characterize biogas materials: Available Carbon-nitrogen ratio[J]. Waste Management, 2017, 62: 76—83.
- [28] 温博婷. 木质纤维素原料的酶解糖化及厌氧发酵转化机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.  
Wen Boting. Study on Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Raw Materials and Mechanism of Anaerobic Fermentation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [29] 牛红志, 孔晓英, 李连华, 等. 厌氧发酵制备生物燃气过程的物质与能量转化效率[J]. 化工学报, 2015, 66(2): 723—729.  
Niu Hongzhi, Kong Xiaoying, Li Lianhua, et al. Material and energy conversion efficiency of biogas preparation process by anaerobic fermentation[J]. CIESC Journal, 2015, 66(2): 723—729. (in Chinese with English abstract)
- [30] Contreras L M, Schelle H, Sebrango C R, et al. Methane potential and biodegradability of rice straw, rice husk and rice residues from the drying process[J]. Water Science and Technology, 2012, 65: 1142—1149.

## Material and energy conversion efficiency of anaerobic fermentation process of *Penisetum* hybrid for biogas

Zhen Feng, Sun Yongming, Kong Xiaoying<sup>\*</sup>, Niu Hongzhi

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Energy grass, as the second generation of new energy crop, has a bright development prospect. Hybrid penisetum was selected as the raw material. Silage is a well-developed technology, which can preserve the nutrient component to a large extent. Ensiling is a process in which water-soluble carbohydrates (WSC) are converted into lactic acid by lactic acid bacteria (LAB) in anaerobic condition. We investigated the physicochemical characteristics of silage grass raw material, and explored the biogas production performances by laboratory batch anaerobic digestion at mesophilic temperature ( $35 \pm 1$ )°C. The results showed that the biogas production of silage grass with the C/N ratios of 137 and 25 (adjusted by urea and ammonium bicarbonate) was 327.02 and 295.43 mL/g respectively, and the corresponding methane content (volume fraction) was 58.49% and 61.05%, while the biogas production of untreated energy grass was 280.02 and 242.33 mL/g, and the methane was 59.96% and 61.46%, respectively. The volatile solid (VS) removal rate of substrate was in the range of 51.68%–57.56%, and it mainly attributed to the degradation of cellulose and hemicellulose. Therefore, the energy grass with high cellulose and hemicellulose content should be selected as the feedstock in the development of energy grass biogas project. In addition, lignin, and organic matter difficult to degrade should be used to enhance the comprehensive benefits of energy grass biogas project. We also established an open material flow analysis system by the anaerobic digestion of silage grass in the LAB-2 500 mL reactor and analyzed the distribution of carbon and nitrogen elements in different material throughout all the digestion process. According to the material flow analysis of silage grass in the anaerobic digestion process, 33.1% and 8% carbon in the raw material entered into the biogas and fermentation broth, respectively, and the other was still in the raw material. The distribution of nitrogen was that 69.4% was in the fermentation broth, and 30.7% was still in the raw material. Moreover, according to the energy flow analysis of silage grass in the anaerobic digestion process, the energy yield of 33.1% entered into the biogas, while the energy yield of 61.3% was still unused in the raw material. The mass conversion rate of energy biomass was low, 60% carbon, 80% nitrogen and 60% energy were still in the digestion residue. Therefore, the use of carbon and nitrogen elements in the energy grass biomass was greatly important in the anaerobic digestion process, and it can be beneficial to improve the efficiency of energy grass biogas project in the future. This study provides a reference for the development and utilization of different energy grasses.

**Keywords:** methane; fermentation; biogas; *Penisetum hybrid*; material flow analysis; material and energy conversion efficiency