

4 种生长环境的巨菌草沼气发酵产气特性研究

魏丹丹^{1,2}, 王昌梅^{1,2,3}, 刘健峰^{1,2,3}, 赵兴玲^{1,2,3}, 吴凯^{1,2,3},

梁承月^{1,2}, 杨斌^{1,2}, 张无敌^{1,2,3*}, 尹芳^{1,2,3*}

(1. 云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省沼气工程技术研究中心, 云南 昆明 650500; 3. 吉林东晟生物质能工程研究院, 吉林 通化 134118)

摘要: 巨菌草是一种优质高产的作物, 用来发酵产沼气的潜力巨大。分别以阳台、焦地、水地和旱地 4 种生长环境下的巨菌草为研究对象进行厌氧消化。在中温 ($35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) 的条件下, 采用批量式发酵工艺, 对其产气特性和有机质含量变化与厌氧消化之间的关系进行分析。试验结果表明: 巨菌草是一种较佳的发酵原料, 阳台、焦地、水地和旱地巨菌草的原料产气率分别为 $616 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $680 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $769 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $643 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$; TS 产气率分别为 $734 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $748 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $836 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $699 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$; VS 产气率分别为 $816 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $901 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1032 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $813 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$; 将纤维素、半纤维素、木质素、粗蛋白、粗脂肪、总糖、低聚糖、还原糖和淀粉在整个发酵周期中的降解情况与产气潜力进行对比可知, 有机质和糖类含量的变化对厌氧消化产气性能的影响较大, 提高有机质去除率可以改善原料的厌氧消化产气性能。对 4 个实验组的巨菌草累积产气量曲线运用一级动力学 Modified Gompertz 方程进行拟合, 分析出 4 种不同生长环境原料消化周期中的产沼气规律, 得出实验组的实际累积产气量均接近于理论累积产气量。试验结果对巨菌草的工程应用与筛选巨菌草作为沼气发酵原料和缓解今后的能源紧缺具有重要意义。

关键词: 巨菌草; 糖类; 木质纤维素; 动力学; 沼气发酵

中图分类号: S216.4; X9 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2022)06-0029-08

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022060029

Study on Gas Production Characteristics of Biogas Fermentation of Giant Juncao in Four Growing Environments / WEI Dandan^{1,2}, WANG Changmei^{1,2,3}, LIU Jianfeng^{1,2,3}, ZHAO Xingling^{1,2,3}, WU Kai^{1,2,3}, LIANG Chengyue^{1,2}, YANG Bin^{1,2}, ZHANG Wudi^{1,2,3*}, YIN Fang^{1,2,3*} / (1. College of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Biogas Engineering Technology Research Center, Kunming 650500, China; 3. Jilin Dongsheng Biomass Energy Engineering Research Center, Tonghua 134118, China)

Abstract: The giant JunCao is a high quality and high yield crop, which has great potential for biogas production by fermentation. In this experiment, the anaerobic digestion of m. The giant JunCao under balcony, scorched land, water land and dry land was studied. Under the condition of medium temperature ($35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), the relationship between the gas production characteristics and the change of organic matter content and anaerobic digestion was analyzed by batch fermentation process. The results showed that, the giant JunCao was a better raw material for fermentation. And the gas production rates of the raw materials were $616 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, $680 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, $769 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ and $643 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ in balcony, coke, water and dry land, respectively. The gas production rates of TS are $734 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, $748 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, $836 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ and $699 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. VS gas production rates were $816 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, $901 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, $1032 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ and $813 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The cellulose, hemicellulose, and lignin, crude protein, crude fat, total sugar, oligosaccharides, reducing sugar and starch degradation situation throughout the fermentation period compared with gas potential, the organic matter and the change of sugar content greatly influenced the performance of the anaerobic digestion gas, improve the removal rate of organic matter can improve the anaerobic digestion of raw material gas properties. The Modified Gompertz equation was used to fit the cumulative gas

收稿日期: 2022-03-16 修回日期: 2022-05-03

项目来源: 云南省万人计划产业技术领军人才项目(20191096); 吉林省科技发展计划项目(20200402099NC; 20200403010SF); 沼气工程与资源化利用劳模创新工作室、云南省国际科技合作专项(202003AF140001); 昆明市国际科技合作基地和云南省农村能源工程重点实验室联合资助。

作者简介: 魏丹丹(1995-), 女, 河南驻马店人, 硕士, 研究方向为生物质能, E-mail: 3243230769@qq.com

通信作者: 张无敌, E-mail: wootichang@163.com; 尹芳, E-mail: yf6709@sina.com

production curves of *m. megaloshis* in four experimental groups, and the biogas production regularity in the digestion cycle of feedstock in four different growing environments was analyzed. The results showed that the actual cumulative gas production of the experimental group was close to the theoretical cumulative gas production. The results are of great significance for the engineering application and screening of Megalograss as biogas fermentation material and alleviating the energy shortage in the future.

Key words: the giant JunCao; sugars; lignocellulose; dynamics; gas potential

在能源危机与生存环境的双重压力下,可再生能源逐渐被人们重视起来,生物质能源、生物柴油和生物乙醇等成为新能源研究的热点,受到了各国政府的关注和扶持^[1]。其中生物质能源是利用光合作用而固定在各种有机体中的太阳能^[2],具有可再生、清洁低碳和原料丰富等优点^[3],主要分为农业资源、城市有机废弃物、畜禽粪便等^[4]。除了依靠上述的各类有机废弃物外,寻求经济、高效的能源作物已经成为世界的发展趋势^[5]。

巨菌草(*pennisetum giganteum z. x. lin*)是一种多年生草本植物,隶属于禾本科狼尾草属^[6],是典型的四碳植物。巨菌草生长速度快、植株高大、产量高,将其作为能源作物,具有很大的开发潜力^[7],目前我国南方被广泛种植。厌氧消化是一种能够将生物质转化为高附加值产品——甲烷的一种高效能源转化方式,非常适合处理有机质含量高的底物。根据测定,巨菌草内含有丰富的粗蛋白和粗脂肪,并且微量元素、维生素、木质纤维素、氨基酸和糖类的含量也很高^[8],适宜作为沼气发酵原料进行厌氧消化。因此,部分学者相继开展了对巨菌草沼气发酵的研究。陈志朋^[9]等研究表明巨菌草作为狼尾草

属可以代替稻草作为碳源进行厌氧消化制取沼气;肖正^[10]等从菌群富集、堆沤预处理和发酵过程对巨菌草高温厌氧消化产沼气进行了初步研究;Kornel Ramaisa^[11]对巨菌草和其他有机废弃物混合发酵进行厌氧消化研究。然而,目前对不同生长环境下的巨菌草作为厌氧消化原料进行产甲烷性能的研究较为匮乏。因此,本文分别选取阳台、焦地、水地和旱地4种生长环境中的巨菌草作为发酵原料,对巨菌草在整个发酵过程中的产气潜力和有机质的变化进行对比分析,探究相关沼气发酵参数不仅对巨菌草沼气工程的运行具有指导意义,也为能源化利用巨菌草提供数据支持和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验中所用的发酵原料是分别生长在阳台、焦地、水地和旱地上的巨菌草,将从云南省昆明市取回的巨菌草晾干后剪碎,然后利用实验室的粉碎机粉碎至40目;接种物取自实验室正常产沼气后的底泥。试验材料的各项基本性质如表1所示。

表1 原料及接种物的基本特性

发酵物料	TS	VS	纤维素	半纤维素	木质素	粗脂肪	粗蛋白	总糖	低聚糖	还原糖	淀粉	pH 值
	%	%	%	%	%	%	%	(mg·g ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)	
阳台巨菌草	83.82	89.54	1.25	18.21	42.63	1.423	29.232	0.276	0.101	0.094	0.073	—
焦地巨菌草	90.78	82.78	29.94	25.34	12.59	1.987	52.395	0.343	0.099	0.076	0.151	—
水地巨菌草	92.09	81.10	14.67	28.45	25.11	1.533	37.256	0.247	0.106	0.104	0.033	—
旱地巨菌草	89.40	84.79	32.29	25.65	9.29	1.498	26.800	0.242	0.100	0.090	0.047	—
接种物	18.18	59.21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.6

1.2 试验装置

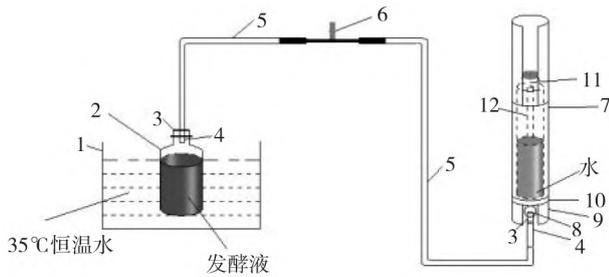
实验装置为实验室自制厌氧消化装置。反应装置(玻璃材质)容积为500 mL,主要由恒温装置、发酵瓶、集气瓶和计量瓶组成。发酵温度由恒温水浴锅控制,发酵瓶中产生的沼气通过导气管进入集气瓶中,随后集气瓶内的水通过导水管排放到计量瓶

内,产生的沼气体积就是排放到计量瓶中的水量。如图1所示。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

试验设计4个实验组和1个对照组,实验组的发酵原料分别是阳台巨菌草、焦地巨菌草、水地巨菌



1. 电热恒温水浴锅; 2. 广口发酵瓶; 3. 橡胶塞; 4. 玻璃管; 5. 导气管; 6. 取气口; 7. 气柜(3、4、8为U形头,9为底座,10为底盖,11为集气瓶,12为通气管)

图1 批量式厌氧消化装置

草和旱地巨菌草。每组均设3个平行,接种物用量为30%,发酵体积为400 mL,发酵温度为 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。对照组和实验组进行厌氧消化,直到产气结束。发酵原料的配比如表2所示。

表2 发酵料液的原料量和接种物量

组别	发酵原料	接种物量 mL	原料量 g	总发酵体积 mL	pH值
实验组	阳台巨菌草	120	6	400	7.5
	焦地巨菌草	120	6	400	7.8
	水地巨菌草	120	6	400	7.7
	旱地巨菌草	120	6	400	7.8
对照组	—	120	0	400	7.6

1.3.2 测定项目及方法

(1) 产气量: 排水集气法收集沼气,每天固定时间记录计量瓶中的水量。

(2) 总固体含量(TS): 将样品在 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 温度下烘至恒重后进行计算^[12]:

$$\text{TS}\% = \frac{W_1}{W_0} \times 100$$

式中: W_0 为样品重量, g; W_1 为样品烘干至恒重后的重量, g。

(3) 挥发性固体含量(VS): 将TS测定的总固体的恒重样品置于 $550^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 的条件下灼烧至恒重,得到灰分质量,进行计算^[12]:

$$\text{VS}\% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

式中: W_2 为灰分质量, g。

(4) 发酵物料的酸碱度(pH值): 用5.7~8.5精密pH试纸测定。

(5) 甲烷含量: 气相色谱仪(GC9700II)测定。

(6) 木质纤维素含量: 木质纤维素的测定主要包括3个部分: 中性洗涤剂纤维(NDF)、酸性洗涤剂

纤维(ADF)和酸性洗涤剂木质素(ADL)。使用F800粗纤维测试仪进行测量和计算^[13]。

(7) 粗脂肪含量: 采用索氏提取法进行测定。

(8) 粗蛋白含量: 先用全自动凯氏定氮仪对样品中的总氮进行测定,得到总氮的含量后乘于6.25。

(9) 总糖: 碘显色法测定。

(10) 还原糖: 采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法法进行测定。

(11) 低聚糖: 采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法法进行测定。

(12) 淀粉: 淀粉含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) = 总糖含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) - 低聚糖含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) - 还原糖含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[14]。

(13) 厌氧消化性能评价,采用Modified Gompertz方程对累积产气量进行拟合^[15]:

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

式中: λ 为时间 t 的累积产气量, mL, 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $y(t) \rightarrow a$, 有 $H_m = a$ 为最大累积产气量, mL; $R_m = a \times c/e$, 为最大产气速率, $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$; $\lambda = (b - 1)/c$, 为发酵滞留时间, d ; e 为 $\exp(1) = 2.71828$ 。在实际数据处理过程中,利用origin软件对参数 a 、 b 和 c 进行拟合,然后转换为 H_m 、 R_m 和 λ 的值,进而用于评价原料的产气性质。

1.3.3 数据分析

(1) 累积产气量: 各试验组累积产气量 - 对照组累积产气量

(2) TS产气率计算公式:

$$\text{TS产气率} = \frac{\text{总累积产气量} - \text{对照组累积产气量}}{W \times \text{TS}}$$

式中: W 为原料质量, g; TS 为原料总固体含量, %。

(3) VS产气率计算公式:

$$\text{VS产气率} = \frac{\text{TS产气率}}{\text{VS}}$$

式中: VS 为挥发性固体含量, %。

(4) 原料产气率计算公式:

$$\text{原料产气率} = \frac{\text{总产气量}}{\text{原料质量}}$$

式中: 总产气量, mL; 原料质量, g。

2 结果与分析

2.1 日产气量的变化分析

试验一共运行了36 d,4个实验组的日产气量

变化如图2所示。在整个厌氧消化过程中,水地巨菌草组和阳台巨菌草组均出现了大幅度波动,其中水地巨菌草组在试验的第3天达到了产气高峰,产气高峰为466 mL,随后的5 d内产气量持续下降,至第8天降低到166 mL。产气量在试验运行的第9~14天上下波动相差不大。阳台巨菌草组在沼气发酵的第4天达到产气最高峰为281 mL,第5天至第6天产气量急剧下降,分别从260 mL降低到97 mL,日产气量在第6天至第7天又迅速增加,从97 mL上升到182 mL。水地巨菌草组和阳台巨菌草组在厌氧消化前期过程中出现的大幅度上下波动现象,原因可能是巨菌草被粉碎后质量较轻,使其浮在发酵液表面,导致巨菌草与接种物混合不均匀。焦地巨菌草组和旱地巨菌草组厌氧消化过程中的日产气量值较为相似,均在第4天达到产气高峰,分别为335 mL和340 mL,随后产气量下降。焦地巨菌草组和旱地巨菌草组在厌氧消化反应进行初期日产气量上下波动相比水地巨菌草组和阳台巨菌草组较小。实验组的产气量主要集中在发酵前期,这是因为发酵产生的挥发性有机酸逐渐被甲烷菌利用,转化成甲烷和 CO_2 ^[16],再加上有机质的含量在发酵前期较为充足,且容易被充分分解利用,极大的促进了早期的产气效果。随着发酵的进行,可降解的有机物含量减少,厌氧体系趋于稳定,日产气量缓慢下降,直到试验结束。

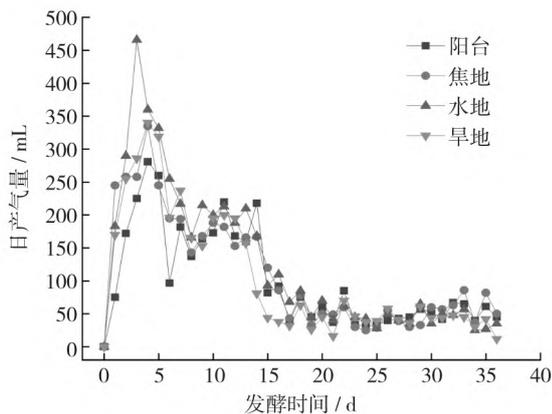


图2 日产气量曲线图

2.2 累积产气量的变化分析

图3给出了4个实验组的累积产气量,阳台巨菌草、焦地巨菌草组、水地巨菌草组和旱地巨菌草组在厌氧消化反应结束后的累积产气量分别为3697 mL、4085 mL、4616 mL和3859 mL。由图可以看出,从实验开始到实验结束,所有实验组的累积产气量

均呈现出上升趋势,说明整个厌氧消化过程处于正常运行状态。其中,水地巨菌草组的累积产气量最高,为4616 mL,在发酵前期的产气速率也是最高,之后产气速率稍微降低,可能是随着厌氧消化反应的进行,水地巨菌草中的木质纤维素等物质被分解,使得有机质的含量在发酵前期较为充足^[17],所以产气速率高于其他试验组。旱地巨菌草组、焦地巨菌草组和阳台巨菌草组的产气速率上下相差不大,且均在发酵前期呈现出大致相同的下降趋势。以上分析得出,水地相比阳台、焦地和旱地环境中生长的巨菌草作为发酵原料更易于产气,主要因为巨菌草属于湿地植物^[17],而阳台、焦地和旱地的生存环境属于其生长过程中的非生物逆境胁迫^[18],会对巨菌草内的有机质等生理生化指标产生影响,从而造成产气量的差异。

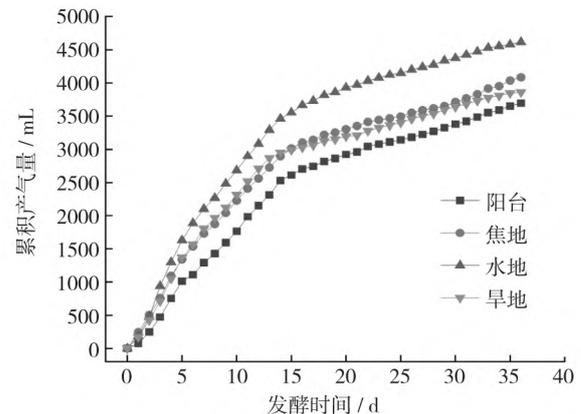


图3 累积产气量曲线图

2.3 甲烷含量的变化分析

在厌氧消化的第2、6、10、14、18、22、26、30、34和36天对实验组所产沼气中的甲烷含量进行测定(见图4)。由图4可以看出,实验组均启动较快,在发酵进行的第6天甲烷含量达到了50%左右,随后呈现出增长的趋势,在第18天均达到了60%以上,其中,焦地巨菌草组甲烷含量为67.89%,高于其他实验组。阳台巨菌草组、焦地巨菌草组、水地巨菌草组和旱地巨菌草组的产甲烷最大值均出现在发酵后期的第36、30、26和26天,其甲烷含量分别为:66.33%、69.54%、63.26%和62.88%。说明巨菌草前中期产生了大量的乙酸、甲酸、和 CO_2 等产甲烷基质,在厌氧消化后期产甲烷菌能够将产甲烷基质进行利用,从而在后期出现了甲烷含量峰值。阳台巨菌草组、焦地巨菌草组、水地巨菌草组和旱地巨菌草组的平均甲烷含量分别为59.28%、61.38%、

56.79%和56.96% 结果表明:4种不同生长环境的巨菌草均可以作为沼气发酵产甲烷的原料且优于平均甲烷含量为50.99%的玉米秸秆^[19]和平均甲烷含量为49%蔬菜废弃物^[20]等其他发酵底物,其中焦地巨菌草组的平均甲烷含量最高,阳台巨菌草组、水地巨菌草组和旱地巨菌草组平均甲烷含量差异较小。

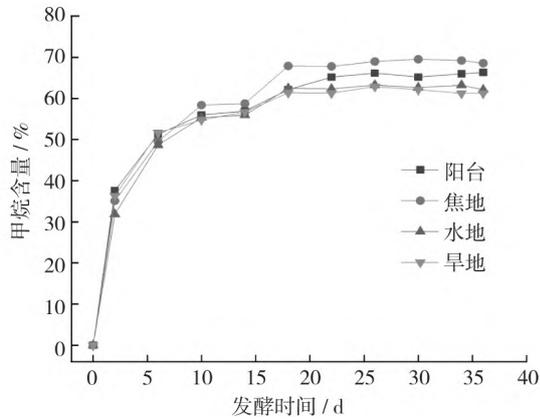


图4 甲烷含量的变化曲线图

2.4 各实验组产气潜力对比分析

通过计算得到了各实验组的产气潜力及平均甲烷含量,详见表3。从表3可以看出,水地巨菌草组的产气潜力最佳。

从表3中的参数可知4个实验组在进行厌氧

表3 原料的产气潜力及甲烷含量

试验组	原料产气率	TS产气率	VS产气率	平均甲烷含量
	(mL·g ⁻¹)	(mL·g ⁻¹)	(mL·g ⁻¹)	%
阳台巨菌草	616	734	816	59.28
焦地巨菌草	680	748	901	61.38
水地巨菌草	769	836	1032	56.79
旱地巨菌草	643	699	813	56.96

消化时,原料产气率、TS产气率、VS产气率和平均甲烷含量均存在差异。水地巨菌草组的原料产气率、TS产气率、VS产气率均高于其他3组,由此可得,在水地环境下生长的巨菌草产气效果最好,主要原因是巨菌草适宜生长在水、湿的环境下^[21],因此水地巨菌草的产气潜力更优,更适合作为发酵原料。但是水地巨菌草组的平均甲烷含量却低于其他3组,具体原因有待进一步分析。

2.5 各实验组厌氧消化前后有机质变化情况对比分析

对进行厌氧消化试验的发酵原料巨菌草分别测定发酵前后料液的纤维素、半纤维素、木质素、粗脂肪、粗蛋白、总糖、低聚糖、还原糖和淀粉含量,并将有机质的变化进行对比分析,如表4所示。

表4 发酵前后料液的有机质变化

样品名称		纤维素	半纤维素	木质素	粗脂肪	粗蛋白	总糖	低聚糖	还原糖	淀粉
		g	g	g	g	g	(mg·g ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)	(mg·g ⁻¹)
阳台巨菌草	发酵前	0.059	0.049	0.007	0.021	0.263	0.118	0.074	0.016	0.025
	发酵后	0.006	0.008	0.074	0.003	0.058	0.084	0.001	0.009	0.067
焦地巨菌草	发酵前	0.077	0.151	0.094	0.074	0.023	0.169	0.090	0.075	0.004
	发酵后	0.011	0.011	0.018	0.061	0.003	0.117	0.005	0.025	0.078
水地巨菌草	发酵前	0.042	0.075	0.008	0.061	0.061	0.193	0.094	0.095	0.004
	发酵后	0.004	0.009	0.050	0.055	0.055	0.099	0.003	0.008	0.079
旱地巨菌草	发酵前	0.030	0.314	0.047	0.072	0.072	0.178	0.075	0.095	0.007
	发酵后	0.007	0.010	0.013	0.064	0.064	0.089	0.003	0.007	0.071

从表4中可以看出4种不同生长环境中的巨菌草厌氧消化前后有机质的含量,主要有纤维素、半纤维、木质素、粗脂肪、粗蛋白、总糖、低聚糖、还原糖和淀粉。通过对比可以发现4个实验组发酵前纤维素、半纤维素、粗脂肪、粗蛋白、总糖、低聚糖和还原糖的有机质含量均高于发酵后,但是除了焦地巨菌草组和旱地巨菌草,剩余两组发酵后的木质素含量相比发酵前略有增加,原因可能是木质纤维素原料中的纤维素和半纤维素均可被厌氧微生物分解利

用,但木质素结构复杂,难以被分解利用^[22],而水地巨菌草可能受生长环境的影响,导致植株在生长的过程中理化性质产生不同,需要进一步探究。发酵后料液中的总糖、低聚糖和还原糖含量均低于发酵前,而4种环境生长的巨菌草经过厌氧处理后淀粉的含量,却与上述情况不同,主要是因为发酵前料液中的大分子有机化合物,即纤维素、半纤维、脂类以及蛋白质等,经水解酶水解后产生的糖类还没有被微生物完全利用,与发酵前料液中的淀粉物质混合,

就出现了淀粉在整个试验周期中不仅没有因为被分解利用而减少,反而增多的现象。

2.6 各实验组有机质和糖类变化率与产气特性的对比分析

通过对发酵前后料液中的纤维素、半纤维素、木质素、粗脂肪、粗蛋白、总糖、低聚糖、还原糖和淀粉的含量进行测定计算,得到不同有机质和糖类的变化情况(如图5和图6所示)。

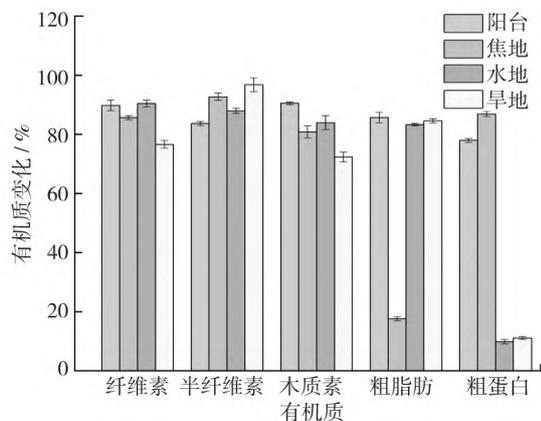


图5 有机质变化率

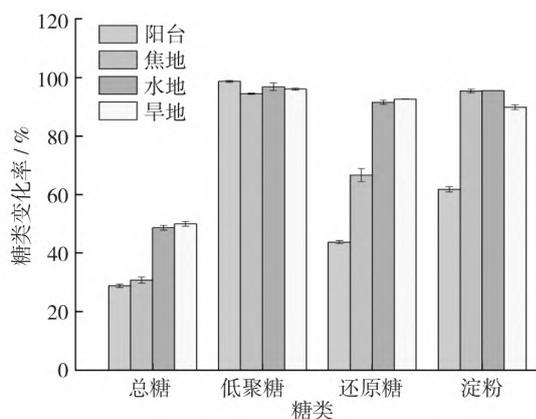


图6 糖类变化率

图中显示,实验组的木质纤维素变化率均达到70%以上,其中水地巨菌草的纤维素变化率最高为90.48%,与巨菌草产气潜力呈现正相关,但是与平均甲烷含量呈现负相关,平均甲烷含量最低;阳台巨菌草和焦地巨菌草的半纤维素变化率与产气潜力的大小一致,且阳台巨菌草的木质素和粗脂肪变化率最高,分别为90.54%和85.71%;4个实验组的粗蛋白变化率与平均甲烷含量呈现正相关,大小为焦地巨菌草>阳台巨菌草>旱地巨菌草>水地巨菌草,可以得出粗蛋白被分解利用可以促进甲烷含量的提升;阳台巨菌草的产气潜力最差伴随着总糖、还

原糖和淀粉变化率的最低,而低聚糖的变化率与其相反,可能是因为糖类没有被微生物充分分解利用,不利于厌氧反应的进行。

2.7 动力学评估

在厌氧消化的周期中,生物质原料的消化降解过程遵循一级动力学相关原理。4个实验组沼气发酵试验得到的累积产气量利用 Modified Gompertz 模型进行拟合处理。将本文中得到的实验数据带入方程中,方程的拟合参数如表5所示,得到的拟合曲线见图7~图10。采用一级动力学方程对阳台、焦地、水地和旱地巨菌草进行曲线拟合,得出4个实验组的实际累积产气量均高于理论累积产气量,并且阳台巨菌草和水地巨菌草拟合结果的 R^2 均大于0.99,

表5 发酵原料厌氧消化累积产气量 Gompertz 方程拟合参数

参数	阳台巨菌草	焦地巨菌草	水地巨菌草	旱地巨菌草
H_m / mL	3539	3870	4458	3658
R_m / (mL·d ⁻¹)	184.89	205.03	260.79	224.76
λ	44.65	34.44	29.56	26.77
R^2	0.9907	0.9894	0.9910	0.9846

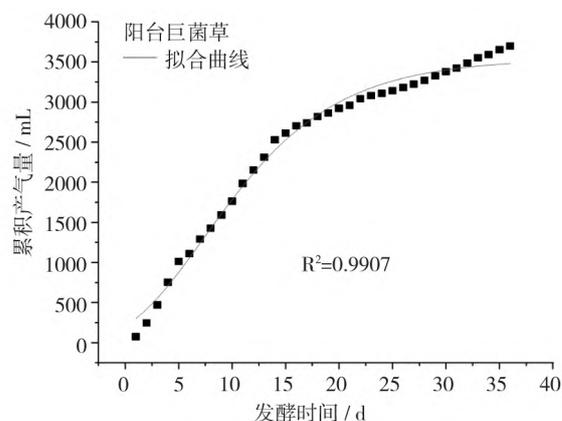


图7 阳台巨菌草厌氧消化累积产气量拟合曲线

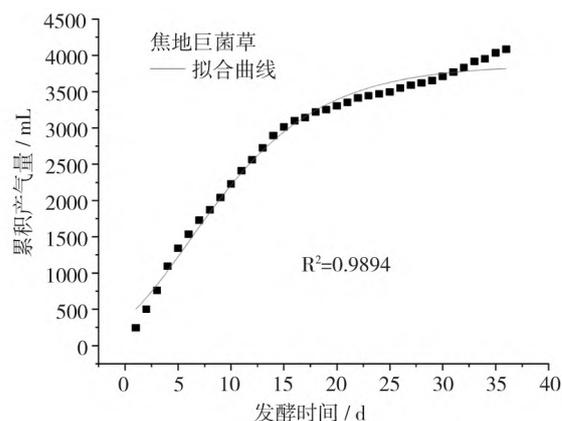


图8 焦地巨菌草厌氧消化累积产气量拟合曲线

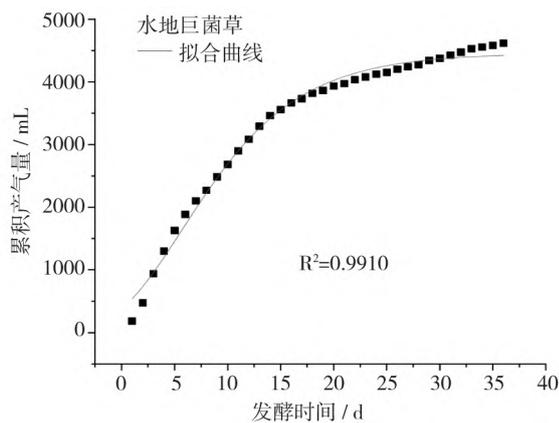


图9 水地巨菌草厌氧消化累积产气量拟合曲线

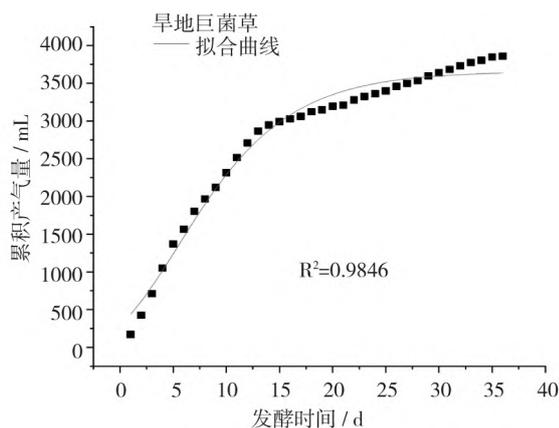


图10 旱地巨菌草厌氧消化累积产气量拟合曲线

焦地巨菌草和旱地巨菌草拟合结果的 R^2 均大于 0.98, 表明拟合方程与数据具有较好的相关性, 拟合可信度较高。

3 结论

(1) 将巨菌草作为厌氧消化原料产沼气, 在实验正常运行的条件下得出阳台巨菌草组、焦地巨菌草组、水地巨菌草组和旱地巨菌草组的原料产气率分别为 $616 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $680 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $769 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $643 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; TS 产气率分别为 $734 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $748 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $836 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $699 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; VS 产气率分别为 $816 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $901 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $1032 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $813 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 平均甲烷含量分别为 59.28%、61.38%、56.79% 和 56.96%。

(2) 巨菌草的植株糖分和有机质含量高, 均被发酵细菌作为底物进一步分解代谢而产生沼气。4 个实验组发酵前纤维素、半纤维素、粗脂肪、粗蛋白、总糖、低聚糖和还原糖的有机质含量均高于发酵后, 但是阳台、焦地、水地和旱地的巨菌草经过厌氧处理

后淀粉的含量高于发酵前 63%、95%、95% 和 90%。焦地巨菌草和旱地巨菌草组除外, 阳台巨菌草和水地巨菌草两组发酵后的木质素含量相比发酵前分别增加和 91%、84%。

(3) 通过分析得出, 水地巨菌草的纤维素变化率最高为 90.48%, 与巨菌草产气潜力呈现正相关, 但是与平均甲烷含量呈现负相关; 阳台巨菌草和焦地巨菌草的半纤维素变化率与产气潜力的大小一致, 且阳台巨菌草的木质素和粗脂肪变化率最高, 分别为 90.54% 和 85.71%; 4 个实验组的粗蛋白变化率大小分别为: 焦地巨菌草 > 阳台巨菌草 > 旱地巨菌草 > 水地巨菌草; 阳台巨菌草的产气潜力随着总糖、还原糖和淀粉变化率的变化最低。有机质和糖类含量的变化对厌氧消化产气性能的影响较大, 提高有机质去除率可以改善原料的厌氧消化产气性能。

参考文献:

- [1] 赵广荣, 杨东. 现代生命科学与科学技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2008.
- [2] 刘偲妍. 巨菌草微生物预处理厌氧发酵产甲烷研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [3] 陈英明, 肖波, 常杰. 能源植物的资源开发与应用 [J]. 氨基酸和生物资源, 2005(4): 1-5.
- [4] 钱伯章, 李敏. 能源结构随能源需求增长而持续多样化—2018 年世界能源统计年鉴解读 [J]. 中国石油和化工经济分析, 2018(8): 51-54.
- [5] 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, 46(3): 135-139.
- [6] 陈碧成, 林洁荣, 罗宗志, 等. 巨菌草不同生长时间的常规营养成分及氨基酸含量测定 [J]. 贵州农业科学, 2016, 44(1): 101-103+109.
- [7] 宋静, 程现光, 穆胜国, 等. 黄土高原沟壑区巨菌草引种试验 [J]. 现代农业科技, 2017(17): 242-244.
- [8] 高勇, 王兆杰. 云南巨菌草产业发展研究 [J]. 经济师, 2020(11): 133-134.
- [9] 陈志彤, 应朝阳, 林永生, 等. 杂交狼尾草的栽培技术与利用价值 [J]. 福建农业科技, 2006(2): 44-45.
- [10] 肖正, 赵超, 刘斌. 巨菌草高温发酵产沼气的初步研究 [J]. 安徽农学通报(上半月刊), 2012, 18(17): 18-21.
- [11] Kornel Ramaisa. 巨菌草和其他有机废弃物厌氧发酵产沼气的研究 [D]. 福建: 福建农林大学, 2015.
- [12] 张无敌, 宋洪川, 尹芳, 等. 沼气发酵与综合利用 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004.
- [13] 刘士清, 张无敌, 尹芳, 等. 沼气发酵实验教程 [M]. 北

- 京: 化学工业出版社, 2013.
- [14] 张无敌, 尹芳, 赵兴玲, 等. 生物质能实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [15] 吉喜燕, 林卫东, 张无敌, 等. 3 种原料中温干发酵和动力学研究 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 240 - 244.
- [16] 李晶宇, 李文哲, 张影微, 等. 发酵原料混合比例对高固含量厌氧发酵的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(11): 101 - 107.
- [17] 夏嵩, 付嘉琦, 付尹宣, 等. 三种湿地植物厌氧发酵产甲烷特性及产物稳定性研究 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2061 - 2066.
- [18] 李磊, 贾志清, 朱雅娟, 等. 我国干旱区植物抗旱机理研究进展 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1053 - 1059.
- [19] 刘红艳. 几种秸秆厌氧消化特性的研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- [20] 魏丹丹, 刘健峰, 邓成杰, 等. 蔬菜废弃物产沼气潜力及特性研究 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49(14): 176 - 179.
- [21] 张家福. 浅议菌草在云南种植的社会效益和经济效益 [J]. 农村实用技术, 2016(3): 26 - 27.
- [22] Brethauer S, Studer M H. Biochemical Conversion Processes of Lignocellulosic Biomass to Fuels and Chemicals—A Review [J]. *Chimia* 2015, 69(10): 572 - 601.