

发酵浓度对奶牛粪厌氧干发酵的影响^{*}

张振, 尹芳, 张无敌, 吴凯, 赵兴玲, 王昌梅, 柳静, 杨红

(云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 在不同发酵浓度下对奶牛粪进行厌氧干发酵实验,并将发酵过程中的数据运用动力学方程进行拟合分析.结果表明:实验运行良好,其中发酵综合效果最好的为 TS=22%组,最大产甲烷速率达到 154.70 mL/d,VS 产甲烷量达到 189.70 mL/g.运用 Modified Gompertz 方程也很好的拟合了各组的产甲烷情况,相关系数皆达到了 0.99 以上.

关键词: 奶牛粪;高浓度发酵;Modified Gompertz 模型

中图分类号: S216.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9793(2019)06-0014-04

随着我国畜牧业的迅速发展,在扩大养殖数量及规模的同时也产生了更多的有机固体废弃物和高浓度有机废水^[1],如果不对这些废弃物进行无害化处理^[2],将会对环境造成严重的破坏,厌氧消化工艺是处理此类农业废弃物的一种行之有效的方法.

厌氧消化又称沼气发酵,根据原料固体含量(TS)的不同,沼气发酵可以分为湿发酵(TS<15%)和干发酵(TS>20%).与湿发酵相比,干发酵具有耗水量小、沼渣沼液量少且营养物浓度高、运输成本低以及发酵设备利用率高等多重优点,在消纳沼渣沼液土地有限和水资源缺乏的地区,其优势更为突出^[3];但厌氧干发酵在启动和运行时面临一些难题,如易酸化(VFA 产生过快)、启动慢、需要搅拌、产气不稳定等^[4].

我国奶牛养殖场当下普遍采用的清粪方式是人工清粪和铲车清粪,采用此类干清粪的方式清理的粪污总固形物(TS)含量高,约为 15%~22%^[1],适宜直接进行厌氧干发酵,从而节省大量水资源并且解决沼液排放量大等问题;而在奶牛

粪的厌氧干发酵中,合适的干发酵浓度(TS)可以带来较高的甲烷产出及能源转换效率.

1 材料与方法

1.1 奶牛粪和接种物

奶牛粪来自昆明市石林县新希望牧场,模拟养殖场自然堆放晾晒 2 d 后备用,其总固体含量(TS)为 35.38%±0.4%,挥发性固体含量(VS)为 75.33%±0.05%.接种物由活性污泥和新鲜奶牛粪在 37℃条件下长时间驯化而得,其总固体含量(TS)为 9.80%±0.11%,挥发性固体含量(VS)为 54.77%±0.15%.

1.2 实验设计

实验装置为实验室设计的厌氧消化装置^[5],设计工作体积为 200 mL.实验设置实验组和对照组;其中对照组配料为接种物和水;为探究不同发酵浓度对厌氧干发酵的影响,设计各实验组 TS 分别为 20%、22%、24%和 26%,每组设 3 个平行;发酵瓶放置于(37±1)℃水箱中水浴保温.具体设计如表 1 所示.

* 收稿日期:2019-10-09

基金项目:国家自然科学基金(51366015)和云南省沼气工程技术研究中心联合资助项目.

作者简介:张振(1996-),男,云南禄劝人,硕士研究生,主要从事生物质能与环境工程方面研究.

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

表 1 实验设计
Table 1 Experimental design

发酵温度/℃	发酵浓度/%	接种量/%	奶牛粪/g	接种物/g	水/g
37±1	20	30	97.50	60	42.50
	22	30	108.91	60	31.09
	24	30	120.34	60	19.66
	26	30	131.77	60	8.23

1.3 测定方法

(1) 总固体含量 (TS) 和挥发性固体含量 (VS) 采用标准方法测定^[6];

(2) 产气量测定采用排水集气法, 取各实验组 3 个平行的平均值;

(3) CH₄ 含量利用气相色谱仪 (福立 GC9700 II 型) 测定;

(4) 厌氧消化性能评价采用 Modified Gompertz 方程拟合各组奶牛粪发酵的累积产气量^[7].

2 结果与分析

根据各实验组的日产气量和日甲烷含量绘制出甲烷含量变化曲线 (图 1)、日产甲烷量曲线 (图 2) 和累计产甲烷量曲线 (图 3)。

2.1 不同发酵浓度对厌氧干发酵甲烷含量的影响

由图 1 可知, 发酵前 6 天, 各组甲烷含量均未达到 40%, 处于厌氧发酵三阶段中的水解酸化阶段。从第 7 天开始, 各组甲烷含量皆上升至 45% 以上, 此时各组产出的沼气可以点燃且持续燃烧, 火焰呈现淡蓝色^[8]。随后各实验组所产沼气中甲烷含量皆快速上升, 发酵浓度为 24% 和 26% 组的甲烷含量上升至 60% 左右, 但是发酵浓度 20% 和 22% 组的甲烷含量仅上升至 55% 左右。在第 15—20 天, 各组的甲烷含量达到第一个高峰期, 其中甲烷含量最高的仍然是 24% 组, 为 64% 左右, 在此时间段后, 各组的甲烷含量在第 25—30 天达到第二个高峰, 到了第 40 天左右又达到第三个高峰

期, 期间甲烷含量基本都在 50% 左右。第 50 天以后各组的甲烷含量皆稳定缓慢下降, 已处于发酵末期, 最终稳定在 45%—55% 之间, 直至发酵结束。

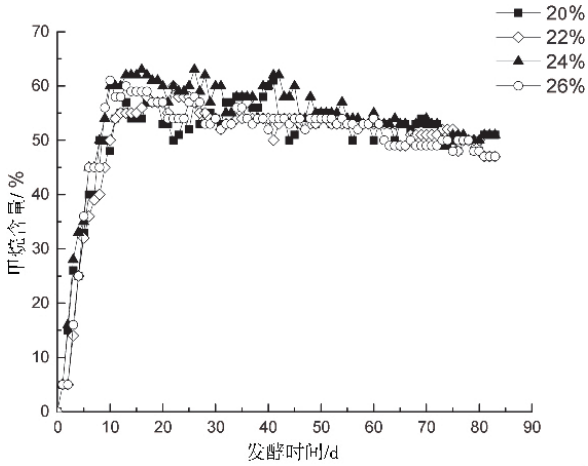


图 1 甲烷含量

Fig.1 Methane content

2.2 不同发酵浓度对厌氧干发酵日产甲烷量的影响

各实验组日净产甲烷量如图 2 所示。可以看到在发酵初期, 日产甲烷量呈现快速上升的状态。在第 11 天左右每组每天产甲烷量皆高于 150 mL, 但是 20% 组和 22% 组的略高于 24% 组和 26% 组的, 原因可能是因为发酵浓度较低两组前期的降解效果较好。各组的产甲烷量在第 20 天左右开始快速下降, 其中 22% 组和 24% 组降幅较大, 在整个下降过程中, 可看到大多数时间里 24% 组和 26% 组的日产甲烷量高于 20% 组。在第 40 天以后, 各实验组的日产甲烷量已慢慢不足 50 mL, 发酵接近结束。

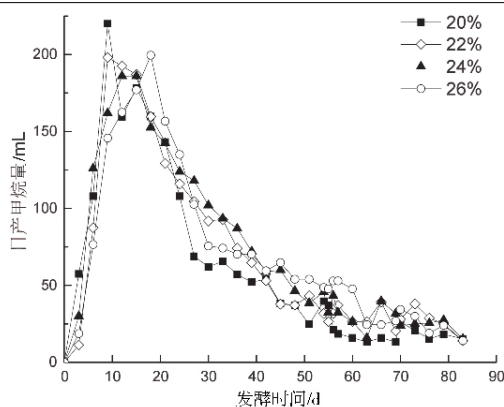


图 2 日净产甲烷量

Fig.2 Net daily methane production

2.3 不同发酵浓度对厌氧干发酵累计产甲烷量的影响

计算得到各实验组累计产甲烷量以及产气效率如图 3 和表 2 所示.从图 3 可以看出,26%组累计产甲烷量在前 30 天低于其余三组,但是在第 30—40 天内产甲烷速率提高,超过了 20%组;24%和 22%组在第 30 天左右产甲烷速率(即图中曲线斜率)保持较高水平,最终这三组的累计产甲烷量都达到了相对较高水平,分别为 22%组

6 016 mL、24%组 6 102 mL 和 26%组 6 003 mL,而 20%组累计产甲烷量是四组实验组中最低的,为 5 382 mL.若将累计产气量的 80%那一天定为该工程的 HRT^[9],则 20%、22%、24%和 26%组的 HRT 分别可以定为 39 d、42 d、43 d 和 48 d.

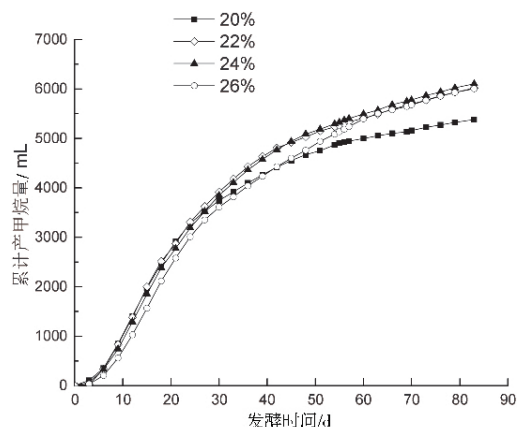


图 3 累计产甲烷量

Fig.3 Cumulative methane production

从厌氧干发酵产气效率对比表可以看出,最终 22%组 VS 产甲烷量最高,达到 189.70 mL/g,其次为 20%组和 24%组.

表 2 不同浓度干发酵产甲烷量对比

Table 2 Comparison of methane production by dry fermentation with different concentrations

组别	TS 产甲烷量/(mL/g)	VS 产甲烷量/(mL/g)	平均甲烷含量/%	累计产甲烷量/mL
20%组	135.29	182.44	53.01	5 382.16
22%组	139.92	189.70	52.89	6 016.81
24%组	126.13	168.62	55.77	6 102.00
26%组	121.63	165.93	52.87	6 003.60

2.4 反应动力学分析

表 3 运用动力学方程拟合结果

Table 3 Results of dynamic equation fitting

组别	累计产甲烷量 (H_m)/mL	最大产甲烷速率 (R_m)/(mL/d)	滞留时间 (λ)/d	TS 产甲烷率 (mL/g)	VS 产甲烷率 (mL/g)	相关系数 (R)
20%组	5 173.43	151.23	1.24	130.05	175.36	0.992 7
22%组	5 747.80	154.70	1.24	133.67	181.22	0.992 5
24%组	5 891.96	150.08	1.25	121.78	162.81	0.994 1
26%组	5 854.20	137.62	1.26	118.60	161.80	0.991 3

在厌氧消化周期中,生物质原料的消化降解过程遵循一级动力学相关原理^[10].将不同发酵浓度四个组别的日产甲烷量和累计产气量利用 Modified Gompertz 方程进行拟合处理,得到各组拟合结果如表 4.从拟合结果可以看出,最大产甲烷速率及 VS 产甲烷率仍然是 22% 组,与实际实验结果相符.各组别的相关系数皆在 99% 以上,说明拟合方程与实验所得结果数据具有较好的相关性,拟合结果可信度高.

3 结 论

(1)在不同发酵浓度的奶牛粪厌氧干发酵实验中,发酵浓度为 22% 的组别最大产甲烷速率和 VS 产甲烷量皆为最高,呈现出较好的发酵效果,在实际工程的奶牛粪的干发酵中,可将总发酵浓度(TS)设置为 22%.

(2)Modified Gompertz 模型可以较好地拟合四组实验的数据,相关系数皆达到了 0.99 以上,表明整个沼气发酵过程符合一级动力学相关原理.

参 考 文 献:

- [1] 施正香,孙飞舟,刘志丹,等.我国奶牛养殖粪污综合治理和资源有效利用的现状与对策[J].中国畜牧杂志,2013,49(20):35-40.
- [2] 陶秀萍,董红敏.畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展[J].中国农业科技导报,2017(1):43-48.
- [3] 郑盼,尹芳,张无敌,等.添加活性炭的猪粪厌氧干发酵研究[J].中国沼气,2018,36(1):54-57.
- [4] 江皓,沈怡,聂红,等.鸡粪与玉米秸秆的干式厌氧发酵实验研究[J].可再生能源,2018,36(5):639-643.
- [5] 周双双,王昌梅,赵兴玲,等.两种花卉秸秆中温发酵产沼气潜力实验[J].云南师范大学学报(自然科学版),2019,39(3):12-15.
- [6] 中国科学院成都生物研究所沼气发酵常规分析编写组.沼气发酵常规分析[M].北京:科学技术出版社,1984.
- [7] 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):1 843-1 850.
- [8] 刘红艳,王昌梅,赵兴玲,等.山竹果皮发酵产沼气潜力的试验研究[J].云南师范大学学报:自然科学版,2019,39(3):7-11.
- [9] 纪钧麟,尹芳,刘丽春,等.菟丝子发酵产沼气潜力试验[J].云南师范大学学报(自然科学版),2017,37(6):6-9.
- [10] 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.

Effect of Fermentation Concentration on Anaerobic Dry Fermentation of Dairy Cow Manure

ZHANG Zhen, YIN Fang, ZHANG Wu-di, WU Kai, ZHAO Xing-lin,
WANG Chang-mei, LIU Jing, YANG Hong

(School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to explore the suitable fermentation concentration in anaerobic dry fermentation of cow manure, anaerobic dry fermentation of cow manure was conducted under different fermentation concentration gradients. The dosage of inoculum was 30% and the temperature was set to medium temperature (37 ± 1) °C. The data of fermentation process were fitted and analyzed by the kinetic equation Modified Gompertz model. The results showed that the four experimental groups worked well, and the best comprehensive fermentation effect was TS=22%, the maximum methane production rate was 154.70 mL/d, and the methane production volume of VS was 189.70 mL/g. The model Modified Gompertz was also used to fit the methane production of each group, and the correlation coefficients were above 0.99.

Keywords: Cow manure; Dry fermentation; Fermentation concentration; Modified Gompertz model