

干清猪粪半干法厌氧发酵关键技术参数优化

陈文成, 孙 京, 袁存亮, 邢向欣, 李 靖, 赵国明

(吉林省农业机械研究院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 为解决干清猪粪的污染问题, 实现规模化猪场干清粪污水的无害化、资源化利用, 通过干清猪粪进行半干法厌氧发酵试验, 并对其关键技术参数进行了优化, 确定了一种适用于干清猪粪半干法厌氧发酵产沼气的工艺。通过对发酵系统的接种物比例、搅拌方式等进行研究, 得到的结果表明: 发酵温度设为中温 35 ℃, 接种比例为 50% 时, 干清猪粪的厌氧产沼气效果最好, 原料产气率可达 471.4 mL·g⁻¹ TS; 在不同搅拌参数对干清猪粪厌氧发酵影响试验中, 当搅拌间隔 2 h, 搅拌转速为 30 r·min⁻¹, 搅拌时长为 4 min 的条件下, 干清猪粪半干法厌氧发酵产沼气效果较好。研究表明, 干清猪粪半干法厌氧发酵具有节水节能的优点又具备良好的产沼气能力可获得清洁能源, 对干清猪粪的资源化利用有很好的指导意义, 并对指导工程实践也具有重要意义。

关键词: 干清猪粪; 接种率; 厌氧发酵; 搅拌参数

中图分类号: S216.4; X713 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)05-0018-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023050018

Optimization of Key Technical Parameters of Fresh Pig Dung / CHEN Wencheng, SUN Jing, YUAN Cunliang, XING Xiangxin, LI Jing, ZHAO Guoming / (Jilin Agricultural Machinery Research Institute, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the pollution problem of fresh pig dung and realize the harmless and resource utilization of large-scale pig farm, this paper carried out semi-dry anaerobic fermentation test of fresh pig dung and optimizes the key technical parameters, and determines a process suitable for anaerobic biogas production of fresh pig dung. By studying the proportion of inoculants and mixing method of the fermentation system, the results show that the fermentation temperature is 35 ℃, and the inoculation ratio is 50%, the anaerobic biogas yield of fresh pig dung is the best, and the raw gas yield can reach 471.4 mL·g⁻¹ TS. In the test of anaerobic fermentation of different mixing parameters, when the mixing speed is 30 r·min⁻¹ and the stirring time is 4 min. The study shows that the semi-dry anaerobic fermentation of fresh pig dung has the advantages of water saving and energy saving and has a good biogas production capacity to obtain clean energy, which has a good guiding significance for the resource utilization of fresh pig dung, and is also of great significance for guiding the engineering practice.

Key words: fresh pig dung; inoculation rate; anaerobic fermentation; mixing parameters

我国是一个畜牧业发展大国, 畜禽养殖产业的快速发展导致每年畜禽粪污排放量十分巨大。据统计^[1], 我国每年所产生的畜禽粪污可达 40 亿吨, 对环境造成了巨大污染, 畜禽粪便的无害化处理已成为畜禽养殖业面临的紧迫问题^[2]。因此, 如何迅速高效地解决畜禽粪便的合理利用问题已成为我国学者的主要研究方向^[3-4]。目前对畜禽粪便主要采用湿法厌氧发酵和干法厌氧发酵两种发酵工艺, 湿法厌氧发酵的 TS 通常控制在 6% ~ 10% 左右, 畜禽粪

便在进行厌氧发酵时还需额外添加水或沼液等来调节发酵料液浓度, 从而造成水资源的大量浪费并且后续沼液处理也是一大难题^[5-6]; 而干法厌氧发酵的 TS 通常控制在 25% 以上^[7-8], 在厌氧发酵过程中为维持较高的厌氧发酵浓度需要在发酵原料中加入添加剂保持物料通气性, 因此对设备要求较高, 搅拌也成为难题。近年来, 应环保部门要求我国畜禽舍多采用干清粪工艺对粪便进行清理与收集, 其物料 TS 浓度在 10% ~ 25%, 含水量低^[9], 而直接将其

收稿日期: 2022-10-17 修回日期: 2023-01-27

项目来源: 吉林省重点新产品计划(20200403160SF)

作者简介: 陈文成(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为农业废弃物处理与资源化利用, E-mail: 2470926263@qq.com

通信作者: 赵国明, E-mail: 1453978737@qq.com

用于半干法厌氧发酵的工艺鲜有报道。本文则以干清猪粪为发酵原料,对干清猪粪半干法厌氧发酵的关键技术参数进行优化研究,确定一种适合干清猪粪的厌氧发酵工艺,为后续干清粪便的资源化无害化处理提供有力的解决途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用原料为采用机械干清工艺收集后的干清猪粪,接种物为干清牛粪经过充分厌氧反应后直至不再产气的活性污泥。为更好地对干清猪粪厌氧发酵进行研究,测定原料及接种物的理化性质如表 1 所示。

表 1 干清猪粪及接种物的理化性质

原料	TS 含量/%	VS 含量/%	pH 值	C/N
干清猪粪	26.2	78.6	7.1	14.7
接种物	10.2	38.7	8.2	8.1

1.2 试验方法

1.2.1 干清猪粪半干法厌氧发酵接种率优化方案

采取批式试验,发酵温度设定为 35 °C;固定总反应料液质量相同,根据测定的接种物干物质含量、干清猪粪干物质含量以及半干法料液浓度 10% ~ 25%,确定调配料液需加入干清猪粪、接种物,分别调配出接种率(按物料 TS 质量计)为 20%、30%、40%、50%、60%、70% 这 6 种发酵料液;对其产沼气效果进行对比分析,确定干清猪粪半干法厌氧发酵适宜的接种率。具体试验设计如表 2 所示,每个试验组设置 3 个平行试验。

表 2 接种率对干清猪粪半干法厌氧发酵影响试验设计

组别	猪粪质量	接种物质量	接种率	发酵温度	料液浓度
	g	g	%	°C	%
T1	365.4	234.6	20	35 ± 1	13 ~ 20
T2	314.4	258.6	30	35 ± 1	13 ~ 20
T3	221.2	378.8	40	35 ± 1	13 ~ 20
T4	168.1	431.9	50	35 ± 1	13 ~ 20
T5	123.6	476.4	60	35 ± 1	13 ~ 20
T6	85.8	514.2	70	35 ± 1	13 ~ 20

1.2.2 干清猪粪半干法厌氧发酵搅拌参数优化方案

1.2.2.1 首先对物料“发料”的测定试验

按 2.1.1 优化出的接种比例(按物料 TS 质量计)与干清猪粪搅拌均匀后一次性装入发酵装置

中,在 35 °C 下进行厌氧发酵。通过试验观察发现,第 1 次进料 12 h 后物料达到发料极限(见图 1)。随着厌氧发酵过程的继续进行后续物料达到发料极限的时间持续减短,在到达反应高峰时物料达到发料极限的时间仅为 3.5 h,故而确定搅拌间隔上限为 3.5 h,否则发酵物料将会溢出(见图 2)。然后对搅拌转速进行试验摸索,发现当搅拌转速低于 10 r·min⁻¹时,物料只能沿搅拌叶翅实现部分的周向运动,难以达到匀质的效果;而当搅拌转速达到 45 r·min⁻¹以上时,物料会因转速过快产生大量的泡沫造成出气口堵塞(见图 3),进而发生物料溢出现象,故而确定搅拌转速范围选取 10 r·min⁻¹ ~ 45 r·min⁻¹。同时发现在物料达到发料极限时,开启搅



图 1 发料极限状态



图 2 发酵物料溢出



图 3 发酵物料起沫

拌,发酵料液液位可在 2'30"到 3'10"的时间内既能恢复正常液位高度,又能达到传质均匀的效果,综合考虑匀质效果和搅拌耗能,搅拌时长确定为 4 min。

1.2.2.2 搅拌参数优化

根据上文确定的搅拌参数范围,在控制搅拌时长、发酵温度、料液浓度等其他发酵条件相同的情况下,分别设置不同的搅拌转速与搅拌间隔,通过对产沼气情况的对比确定适合的搅拌参数,具体试验设计如表 3 所示。

表 3 搅拌参数优化试验设计

组别	搅拌转速 ($r \cdot \min^{-1}$)	搅拌间隔 h	搅拌时长 min	温度 ℃	猪粪质量 g	接种物质量 g	接种率 %
T1	15	3	4	35 ± 1	1682	4318	50
T2	30	3	4	35 ± 1	1682	4318	50
T3	45	3	4	35 ± 1	1682	4318	50
T4	30	1	4	35 ± 1	1682	4318	50
T5	30	2	4	35 ± 1	1682	4318	50
T6	30	3	4	35 ± 1	1682	4318	50

1.3 试验装置

所用装置如图 4 所示,由恒温水浴锅、锥形瓶、广口瓶、软管、夹子组成。锥形瓶作为反应容器,广口瓶作为集气瓶和集水瓶,试验开始前将软管依次连好锥形瓶与广口瓶并用夹子夹紧排气管,恒温水浴锅设置为 35 ℃。在装料前要检查整个反应装置的气密性,防止漏气产生对试验数据的误差。

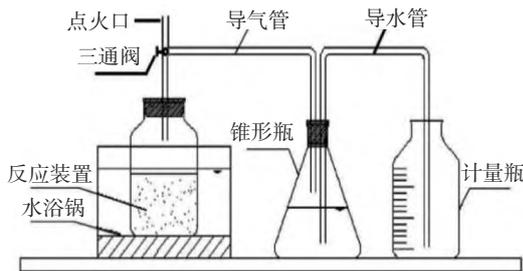
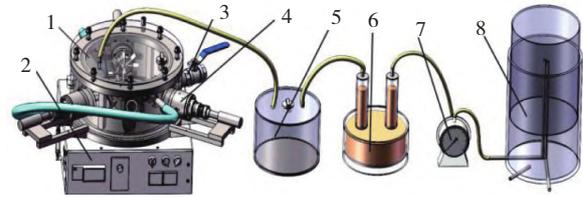


图 4 厌氧发酵装置

试验装置为自主研发的卧式三轴搅拌厌氧发酵反应器,反应器容积约为 10 L。整个厌氧发酵系统(见图 5)还包括电控系统、水箱循环系统、反应器、脱硫脱水装置、湿式气体流量计、集气装置等构成。通过电控系统,控制电机带动反应器内部的搅拌叶来实现对发酵物料的搅拌,搅拌装置结构如图 6 所示。通过调速器调节电机转速,通过时控开关来控制搅拌电机的开启与关闭,从而满足不同的搅拌

间隔与搅拌时长,通过水箱循环系统以及测温传感器和控制系统,可实现对发酵物料的温度控制。



1. 发酵罐体; 2. 控制电箱; 3. 出料口; 4. 搅拌轴; 5. 脱水装置; 6. 脱硫装置; 7. 流量计; 8. 集气装置

图 5 卧式三轴搅拌厌氧发酵反应器

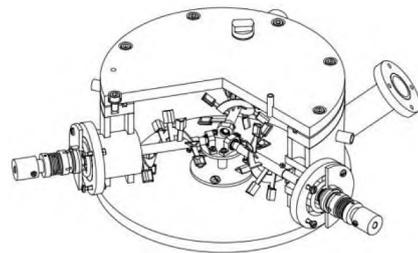


图 6 搅拌装置结构示意图

2 结果与分析

2.1 接种率对干清猪粪厌氧发酵的影响

2.1.1 pH 值

图 7 为接种率不同时各试验组 pH 值变化曲线,由图可以看出 20% 接种率试验组从反应初始直至反应结束 pH 值持续下降,这是由于 20% 接种率试验组所含接种物较少不能及时消耗水解酸化后的产物,导致 pH 值持续降低,产甲烷菌无法生存。30% ~ 70% 接种率试验组 pH 值变化趋势基本相同,前期变化较大后期趋于稳定在 6.8 ~ 7.5 可以满足厌氧发酵的要求。

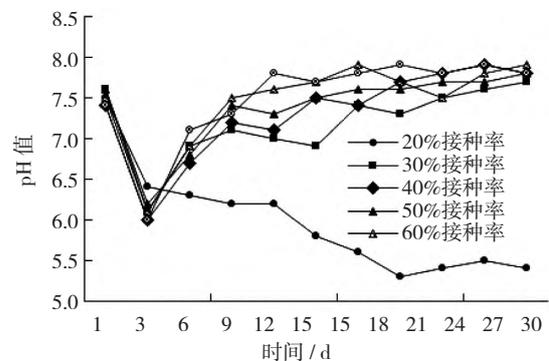


图 7 接种率不同时各实验组 pH 值

2.1.2 产气情况分析

图 8 为不同接种率下干清猪粪半干法厌氧发酵

的日产沼气的变化图。由图 8 可以看出在整个反应过程中,所有试验组日产气量变化趋势基本相同,整个反应周期为 30 天,反应初始先缓慢升高,持续几天后达到产气高峰,随后产气量逐渐减少,直至反应结束。其中 20%、30%、40%、50%、60%、70% 接种率分别在 9、11、16、7、7、6、4 天达到日产气高峰,原料产气率分别为:3.9 mL·g⁻¹TS、11.7 mL·g⁻¹TS、17.4 mL·g⁻¹TS、36.4 mL·g⁻¹TS、41.2 mL·g⁻¹TS、46.8 mL·g⁻¹TS。由图可以看出接种率高的反应高峰到达的时间也较早。图 9 为不同接种率下干清猪粪半干法厌氧发酵的累积产沼气的变化图。由图 9 可以看出各个试验组累积产气量由大到小排列为:50% 接种率 > 40% 接种率 > 30% 接种率 > 60% 接种率 > 70% 接种率 > 20% 接种率,累积产气量分别为 20787 mL、19560 mL、14921 mL、14893 mL、10594 mL、5952 mL;各实验组原料产气率由大到小排列为:70% 接种率 > 50% 接种率 > 60% 接种率 > 40% 接种率 > 30% 接种率 > 20% 接种率,原料产气率分别为 472.9 mL·g⁻¹TS、471.4 mL·g⁻¹TS、459.7 mL·g⁻¹TS、336.9 mL·g⁻¹TS、181.4 mL·g⁻¹TS、62.2 mL·g⁻¹TS。由图 9 可知 50%、60%、70% 接种率试验组累积产气量在前 12 天均比 40%、30%、20% 接种率试验组要高,是由于高接种率所含活性菌种丰富,能及时消化水解产物,提高了反应速率,加快了反应进程。由于 60%、70% 接种率试验组添加干清猪粪的量少,随着反应的进行营养物质消耗殆尽,所以 30%、40% 接种率试验组在反应后期的累积产气量大于 60%、70% 接种率试验组;20% 接种率试验组不能及时消化水解酸化后的产物,形成酸的积累,抑制产甲烷菌的活性,导致产气量总体不高。50% 接种率试验组的接种物及营养物质含量都较为适宜,所以整个发酵过程累积产气量为最高。综上所述,在干清猪粪半干法厌氧发酵中选择 50% 接种率较为适宜。

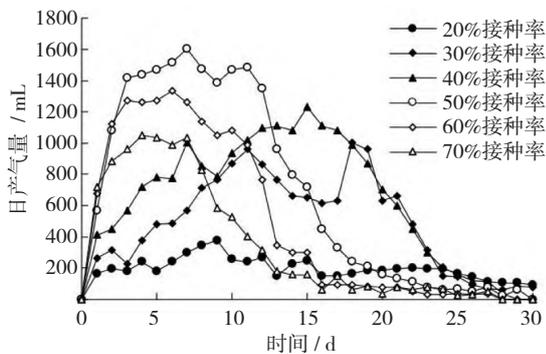


图 8 日产沼气的量

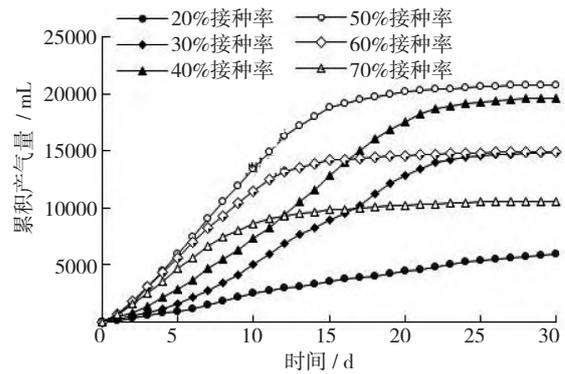


图 9 累积产沼气的量

2.2 搅拌参数对干清猪粪厌氧发酵的影响

2.2.1 pH 值

图 10 为搅拌转速不同时各试验组 pH 值变化曲线,由图可以看出各试验组 pH 值变化曲线大致相同均呈现先降低后上升的趋势,且前期变化大主要是因为厌氧发酵前期主要为水解酸化阶段,随后进入产甲烷阶段 pH 值逐渐上升,各试验组 pH 值主要集中在 6.7~7.8 为产甲烷菌提供了良好的生存环境,保障了各试验组厌氧发酵的顺利进行。

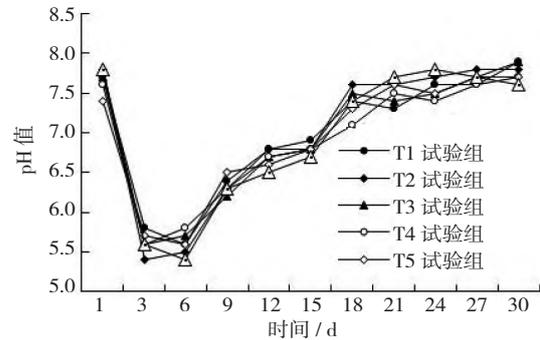


图 10 搅拌参数不同时各试验组 pH 值变化

2.2.2 产气情况分析

由图 11、12 可以看出 6 组试验在日产气量和累积产气量变化趋势大致相同。T1~T3 为搅拌转速不同对干清猪粪厌氧产气的影响,各试验组分别在第 6、6、7 天达到产气高峰,日产气高峰分别为:19.78 L、24.15 L、19.35 L,累积产气量由大到小排列为:T2 > T1 > T3,累积产气量分别为 304.79 L、265.58 L、253.91 L,各试验组所加干清猪粪量一致,所以各试验组原料产气率的大小排列与累积产气量大小排列一致。其中 T2 较 T1 试验组累积产气量提高 14.7%,较 T3 试验组提高 20%。说明:T1 试验组的转速 15 r·min⁻¹相对较低,较 T2 试验组的匀质效果差些,菌种与营养物质的接触不如 T2 试

验组,从而造成产气效果不如 T2 试验组;T3 试验组的转速 $45 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 相对较高,高转速条件下扰乱互营性菌群空间分布关系,影响微生物的活性^[10],从而导致产气量下降。因此,在干清猪粪半干法厌氧发酵中选择 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速有助于厌氧发酵的进行。T4~T6 试验组为搅拌间隔不同对干清猪粪厌氧发酵的影响,产气高峰分别在第 7、8、7 天出现,日产气量分为 22.65 L、24.27 L、17.96 L,T6 试验组在反应过程中日产气量较 T4、T5 组相对较低,但产气高峰持续时间长,这是由于 T6 试验组搅拌间隔较长,同时干清猪粪物料黏度较大,气体不能及时排出,所以产气高峰较 T4、T5 试验组相对较长。T4~T6 试验组累积产气量由大到小排列为:T5 > T4 > T6,累积产气量分别为 329.17 L、272.82 L、262.7 L,其中 T5 较 T4 试验组累积产气量提高 20.6%,较 T6 试验组提高 25.3%。说明:T4 试验组的搅拌间隔为 1 h,搅拌频率相对较高,尤其在物料浓度较高的情况下,会阻碍产甲烷区域的形成和扩张,使菌种活性受到抑制,导致产气量下降。T6 试验组的搅拌间隔为 3 h,搅拌频率相对较低,每次搅拌之后,随时间推移会出现“发料”现象,气体溢出受阻,而且搅拌间隔过长,减少了菌种与营养物质的接触机会,从

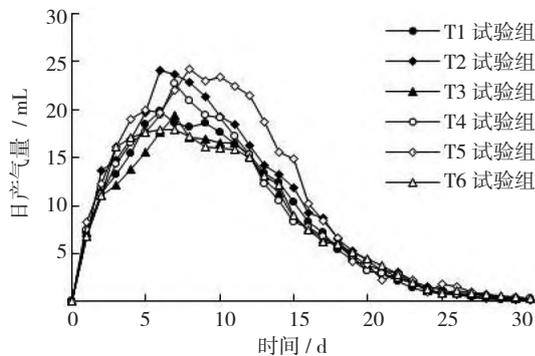


图 11 日产气量

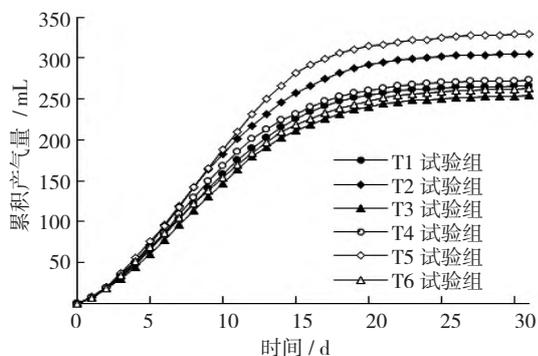


图 12 累积产气量

而导致产气量下降。T5 试验组搅拌间隔为 2 h 时,能够较好地实现原料与接种物之间的传质,微生物活性较强,累积产气量要优于 T14、T6 组。综上所述,在干清猪粪半干法厌氧发酵中选择 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速,2 h 的搅拌间隔有助于厌氧发酵的进行。

3 讨论

3.1 对与前人研究相同或相似的结果予以证实的阐释

(1) 接种物主要是给厌氧发酵反应体系提供菌种以便厌氧发酵快速启动,当发酵料液浓度高时,为了提高厌氧消化的速度,应适当加大接种量,当接种量不足时,发酵启动期延长并可能造成酸化池导致发酵失败,郑盼^[11]在猪粪干式厌氧消化实验中得出,接种量越高,达到产气峰值的时间越早这与本文研究结果相同,高接种率适合猪粪厌氧发酵。

(2) 搅拌对干清猪粪半干法厌氧发酵也有较为直接的影响,Huang Y^[12]等在厌氧发酵机械搅拌装置的研究中发现,机械搅拌能够增加物料的流动性,并且可以提高 VS 降解率和沼气产量。赵东方^[13]等在研究厌氧消化搅拌技术时,对比气体搅拌与机械搅拌时得出,机械搅拌效果要优于气体搅拌效果。本文研究则是选取机械搅拌方式,通过控制搅拌转速与时长对比不同机械搅拌条件下产气情况,得到适合干清猪粪半干法厌氧发酵的搅拌参数。

3.2 本研究需要说明的问题

本文以干清猪粪为例,通过对干清猪粪半干法沼气发酵工艺的研究,确定了适合干清猪粪的半干法沼气发酵事宜的接种率和搅拌参数,为指导工程运行提供一种方案。但畜禽干清粪便不仅仅为干清猪粪,后续应继续针对干清鸡粪、干清羊粪的多种类畜禽粪便进行研究。

4 结论

本次试验利用干清猪粪在中温 (35°C) 条件下进行半干法厌氧发酵,通过对接种比例和搅拌方式的工艺优化发现,接种物比例为 50%、搅拌间隔 2 h,搅拌转速 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,搅拌时长 4 min 时,干清猪粪的半干法厌氧发酵产气情况较好,并且测得猪粪降解率可达 59.5%,降解效果较好。综上所述,干清猪粪半干法厌氧发酵技术具有良好的沼气产率和降解效果,沼液产生量小,可以有效地实现猪粪无害

化处理 and 资源化利用,经济、社会、环境效益显著,具有很好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 徐长春. 畜禽粪便的危害及无公害处理的现状[J]. 新农业,2020(13):56.
- [2] 王小彬,闫湘,李秀英. 畜禽粪污厌氧发酵沼液农用之环境安全风险[J]. 中国农业科学,2021,54(01):110-139.
- [3] 丁少华,应孟飞. 畜禽养殖废弃物处理典型模式与“畜—沼—果”生态循环模式[J]. 农业工程技术,2020,40(29):43-44.
- [4] 董长华. 畜禽粪污资源化利用模式的思考[J]. 中国畜禽种业,2020,16(09):31-32.
- [5] 蒋滔,邓良伟,韦秀丽,等. 牛粪厌氧发酵产气动力学与加热策略研究[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(03):188-194.
- [6] 管志云,邵敏,刘玉坤. 畜禽粪便厌氧发酵技术分析[J]. 今日畜牧兽医,2018,34(11):60+59.
- [7] 郭全忠. 不同处理对猪粪干法厌氧发酵产气性能的影响[J]. 陕西农业科学,2019,65(04):78-82.
- [8] 陈润璐,李再兴,冯晶,等. 农业废弃物厌氧干发酵技术研究进展[J]. 河北科技大学学报,2020,41(04):365-373.
- [9] 郑苇,刘淑玲,李波,等. 禽畜干清粪工艺产生鲜粪的厌氧消化处理技术探讨[J]. 环境卫生工程,2018,26(01):5-8+12.
- [10] 高凯旋. 关于搅拌在沼气发酵过程中的作用[J]. 中国沼气,2015,33(03):69-71.
- [11] 郑盼. 猪粪干式厌氧消化实验研究[D]. 昆明:云南师范大学,2019.
- [12] HUANG Y, MAHMOODPOOR DEHKLORDY F, Li Y, et al. En-hancing Anaerobic Fermentation Performance through Ec-centrally Stirred Mixing: Experimental and Modeling Methodo Logy[J]. Chemical Engineering Journal,2018:10.1016/j.cej.2017.11.088.
- [13] 赵东方. 高含固率污泥厌氧消化搅拌技术及水力特性研究[D]. 北京:北京建筑工程学院,2012.