

甘骏龙, 汪珍, 董星帅, 等. 发酵温度与总固体浓度对牛粪污厌氧产气效率的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1): 169-176.
GAN J L, WANG Z, DONG X S, et al. Effect of fermentation temperature and total solid concentration on anaerobic biogas production efficiency of cattle manure[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1): 169-176.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.19

发酵温度与总固体浓度对牛粪污厌氧产气效率的影响

甘骏龙¹, 汪 珍¹, 董星帅², 宫亚斌¹, 詹偶如¹, 田启欢¹, 曹 磊¹

(1. 杭州能源环境工程有限公司, 浙江 杭州 311106; 2. 平顶山优然牧业有限责任公司, 河南 平顶山 467400)

摘 要:牛粪厌氧发酵是畜牧业污染治理与资源化能源化利用处理的重要途径, 为探究不同养殖工艺下牛粪污浓度与厌氧处理的技术经济性, 设置 2%、5%、7.5%、10% 等 4 个总固体(TS)浓度, 25、30、38、45 °C 等 4 个发酵温度, 开展不同总固体浓度不同温度厌氧发酵试验, 并结合修正 Gompertz 模型及双因素方差分析对发酵参数进行优化。结果表明, 7.5%、10% 的 TS 浓度在 45 °C 时累计产气量显著提升, 7.5% 的 TS 浓度 45 °C 发酵较 38 °C 累计产气量提高 24.13%; 2% 的 TS 浓度因底物竞争抑制, 发酵温度对产气效率的影响差异不显著。修正 Gompertz 模型表明, 45 °C 下产气达 90% 的时间(T_{90})较 25 °C 缩短 5~19 d, 但 TS 浓度 $\geq 10\%$ 时, 因传质阻力延长至 16 d。综上所述, 高 TS 浓度(7.5%~10%)建议采用 40~45 °C 中高温发酵, 水力停留时间 14~16 d, 辅以强化搅拌加回流循环调节; 中低 TS 浓度(2%~5%)推荐 35~38 °C 发酵以优化能效利用效率; 针对规模化工程中养殖场干清粪(TS 浓度 $> 20\%$)与水冲粪(TS 浓度 $< 3\%$)的工艺差异, 提出干清粪采用粪污先厌氧后分离工艺实现沼渣资源化回用, 水冲粪采用粪污前分离工艺实现沼液农田消纳的适配方案。

关键词:牛粪; 资源化能源化利用; 厌氧发酵; Gompertz 模型; 发酵温度; 总固体浓度; 产气效率

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1002-2481(2026)01-0169-08

Effect of Fermentation Temperature and Total Solid Concentration on Anaerobic Biogas Production Efficiency of Cattle Manure

GAN Junlong¹, WANG Zhen¹, DONG Xingshuai², GONG Yabin¹,

ZHAN Ouru¹, TIAN Qihuan¹, CAO Lei¹

(1. Hangzhou Energy and Environmental Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311106, China;

2. Pingdingshan Youran Dairy Husbandry Co., Ltd., Pingdingshan 467400, China)

Abstract: Anaerobic fermentation of cattle manure is a key route for pollution control and resource-energy utilization processing in the livestock sector. To clarify the techno-economics of cattle manure concentration and anaerobic treatments under different breeding technology, in this study, four total-solid(TS) concentrations of 2%, 5%, 7.5%, and 10% and four fermentation temperature of 25 °C, 30 °C, 38 °C, and 45 °C were set, anaerobic fermentation tests with different total-solid(TS) concentrations and fermentation temperature were conducted, fermentation parameters were optimized combined with the modified Gompertz model and two-way ANOVA. The results showed that the cumulative biogas production of 7.5% and 10% of TS concentrations at 45 °C was significantly increased. Biogas yield of 7.5% of TS concentration at 45 °C was higher by 24.13% than that at 38 °C. Owing to substrate competition inhibition at 2% of TS concentration, the fermentation temperature showed no significant effect on biogas production efficiency. The modified Gompertz model indicated that time to 90% of ultimate production(T_{90}) at 45 °C was 5-19 day shorter than that at 25 °C, but it was extended to 16 day when TS $\geq 10\%$ because of mass-transfer resistance. In conclusion, medium or high temperature fermentation of 40-45 °C was recommend for high TS concentrations(7.5-10%) with hydraulic retention time of 14-16 day, combined with intensive mixing and digestate recycle. Operation of 35-38 °C was recommend for medium or low TS concentrations(2-5%) to optimize energy efficiency.

收稿日期: 2025-03-11

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1701401-04); 浙江省尖兵研发攻关计划(2022C03001)

作者简介: 甘骏龙, 助理工程师, 主要从事有机废弃物厌氧发酵技术研究, E-mail: 2487440800@qq.com

通信作者: 宫亚斌, 高级工程师, 主要从事有机废弃物厌氧发酵及沼液资源化处理技术研究, E-mail: 394012747@qq.com

Aiming at the technology differences between dry cleaning of manure(TS concentration $>20\%$) and water flushing of manure(TS concentration $<3\%$) in large-scale engineering, a suitable solution was proposed: for dry cleaning of manure, a technology of anaerobic fermentation first then separation of manure was adopted to accomplish the resource utilization of biogas residue, and for water flushing of manure, a pre-separation technology of manure was adopted to accomplish the digestion of biogas slurry in farmland.

Keywords: cattle manure; resource and energy utilization; anaerobic fermentation; Gompertz model; fermentation temperature; total solid concentration; biogas production efficiency

牛粪的资源化能源化利用是缓解畜牧业环境污染与能源短缺矛盾的关键路径。据国家数据库统计,2023年我国牛粪年产量约14亿t,综合利用率不足60%^[1]。将牛粪进行厌氧发酵,生产沼气回收清洁能源及牛粪固体生产再生垫料等技术是目前的主要技术,能够提高粪污的综合利用率^[2-3],该技术已被广泛应用于奶牛场粪污的处理。温度在厌氧发酵过程中起着至关重要的作用^[4]。近年来,国内外学者针对不同原料和工艺条件开展了系统性研究。刁彦花等^[5]通过序批式试验研究了中温35℃和高温55℃对牛粪高浓度厌氧发酵,结果表明,高温较中温累计产气量可提高17.27%。庞震鹏等^[6]优化牛粪与番茄秸秆混合发酵工艺,在25~40℃确定35℃为最佳温度,且系统稳定性显著优于其他温度组;楚莉莉等^[7]采用响应面法分析牛粪污接种量与温度交互作用,也表明在25~40℃内,35℃时牛粪厌氧发酵产气效率最高,甲烷产率为259.50 mL/g;卞永光等^[8]研究发现,牛粪污总固体(TS)浓度越高,产气量越大;邢向欣等^[9]研究表明,TS浓度为8%~14%时,牛粪发酵最适温度为35℃。这些研究虽取得一定进展,但忽视了不同养殖工艺下的粪污浓度特性及规模化工程中发酵温度的技术经济性问题。

目前,杭州能源环境工程有限公司研发团队研究发现^[10-13],采用42~45℃中高温厌氧发酵可显著提升厌氧产气效率。本研究针对不同养殖场清粪工艺造成的粪污浓度差异,开展了TS浓度2%、5%、7.5%、10%的牛粪污在25、30、38、45℃发酵温度下的厌氧发酵产气试验,以探究不同粪污浓度厌氧处理工艺的最佳参数;并通过显著性分析与修正Gompertz方程拟合,分析不同温度和TS浓度条件下牛粪污的厌氧发酵效果,确定最优发酵参数,旨在结合试验结果对规模化工程工艺设计提出建设性的意见。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试牛粪污取自山东某牛粪资源化工程项目,其TS浓度分别是26.96%和1.96%,对应的挥发性固体(VS)浓度分别是24.61%和1.36%。试验中所使用的接种物为杭州能源环境工程有限公司实验室保存的牛粪厌氧发酵活性污泥,是在38℃下经过30d的驯化培养而获得,其TS浓度为2.74%,VS浓度为1.46%。牛粪污和接种物的具体理化性质见表1。

表1 牛粪污和接种物的理化性质

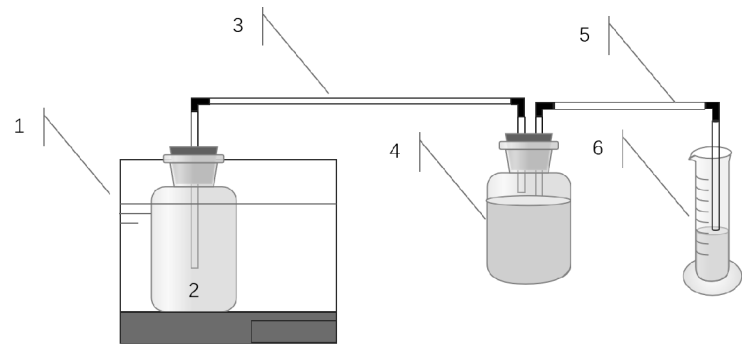
Tab.1 Physicochemical properties of cattle manure and inoculums

物料 Material	TS浓度/% TS concentration	VS浓度/% VS concentration	pH	NH ₃ -N/(mg/L)	TP/(mg/L)	VFA/(mg/L)
接种液 Vaccination solution	2.74	1.46	7.4	734	215	335
牛粪水 Cattle manure liquid	1.96	1.36	7.8	873	658	542
牛粪渣 Cattle manure residue	26.96	24.61	7.5			

1.2 试验方法

试验采用恒温水浴厌氧发酵装置,如图1所示,采用排水法对每日产气量进行计量,其中,发酵瓶使用500 mL广口瓶,集气瓶和集水瓶均为1 000 mL广口瓶。发酵瓶和集气瓶采用橡胶塞、

硅胶软管等进行连接,并在瓶口处涂抹凡士林和石蜡进行密封,保障装置的气密性。试验参数见表2,各物料装瓶完成后,按照图1进行组装,分别置于25、30、38、45℃恒温水浴锅中,每组均设3组重复。



1.恒温水浴锅;2.发酵瓶;3.集气管;4.集气瓶;5.排水管;6.集水瓶
1.Constant temperature water bath; 2. Fermentation bottle; 3.Gas collecting pipe;
4. Gas collecting bottle; 5. Water drain pipe; 6.Water collecting bottle

图 1 试验装置
Fig.1 Test device

表 2 试验设计参数
Tab.2 Test design parameter

发酵温度/℃ Fermentation tem- perature	TS 浓度/% TS concentration	牛粪渣/g Cattle manure residue	牛粪水/g Cattle manure liquid	接种液/g Vaccination solution	总装瓶量/g Total bottle quan- tity	样本数/个 Sample number
25	2	16.32	183.68	200	400	3
	5	64.32	135.68	200	400	3
	7.5	104.32	95.68	200	400	3
	10	144.32	55.68	200	400	3
30	2	16.32	183.68	200	400	3
	5	64.32	135.68	200	400	3
	7.5	104.32	95.68	200	400	3
	10	144.32	55.68	200	400	3
38	2	16.32	183.68	200	400	3
	5	64.32	135.68	200	400	3
	7.5	104.32	95.68	200	400	3
	10	144.32	55.68	200	400	3
45	2	16.32	183.68	200	400	3
	5	64.32	135.68	200	400	3
	7.5	104.32	95.68	200	400	3
	10	144.32	55.68	200	400	3

1.3 测定指标及方法

日产气量:以排水集气法收集气体,每日用量筒定期测量排水体积^[14],共记录 40 d 的产气量。

$$TS \text{ 产气率} = \frac{\text{总产气量}}{(\text{牛粪渣} \times TS_{\text{渣}} \text{ 浓度} + \text{牛粪水} \times TS_{\text{水}} \text{ 浓度})} \times 100\%$$
 (1)

1.4 数据处理

采用 ORgin 2024 版进行数据处理,并通过分析修正后 Gompertz 方程对相关动力参数 P_m 、 R_m 、 λ 进行分析。修正后 Gompertz 方程如下。

$$y(t) = P_m \cdot \exp(-\exp(R_m e / P_m (\lambda - t) + 1))$$
 (2)

式中, $y(t)$ 表示时间为 t 时的累计产气量; P_m 为最大产气量; R_m 为最大产气速率; λ 为滞留时间; e 取 2.718。

2 结果与分析

2.1 不同总固体浓度、发酵温度对牛粪污厌氧发酵日产气量的影响

日产气量是评估原料在厌氧消化过程中性能优劣的关键指标之一,通过分析能够揭示发酵时间与产气量之间的内在规律。各试验组日产气量变

化趋势如图 2 所示,45 ℃条件下的日产气量显著高于 25、30、38 ℃。4 种 TS 浓度在 45 ℃下启动速度均较快,各浓度下日产气量差异较大,变化趋势基本类似,前 10 d 日产气量增高,日产气量先呈上升趋势随后逐渐下降,后 15 d 的日产气量趋于稳定。发酵温度为 45 ℃时,4 种 TS 浓度牛粪厌氧发酵日产气量峰值出现时间比 30、38 ℃早 1~2 d,且除了 25 ℃,其他基本在 15 d 内出现最高峰。HUPFAUF

等^[15]研究表明,在 45 ℃条件下 *Firmicutes* (如 *Thermoanaerobacteraceae* 和 *Halanaerobiaceae*) 和 *Bacteroidetes* 的丰度显著增加。这些菌群具有高效的纤维素酶和半纤维素酶活性,能够快速降解牛粪中的木质纤维素类复杂有机物,释放可溶性糖类供后续酸化与甲烷化利用。根据反应动力学规律,温度过低会减缓酶促反应速率,产气周期延长,因而 25 ℃试验组下产气周期变长。

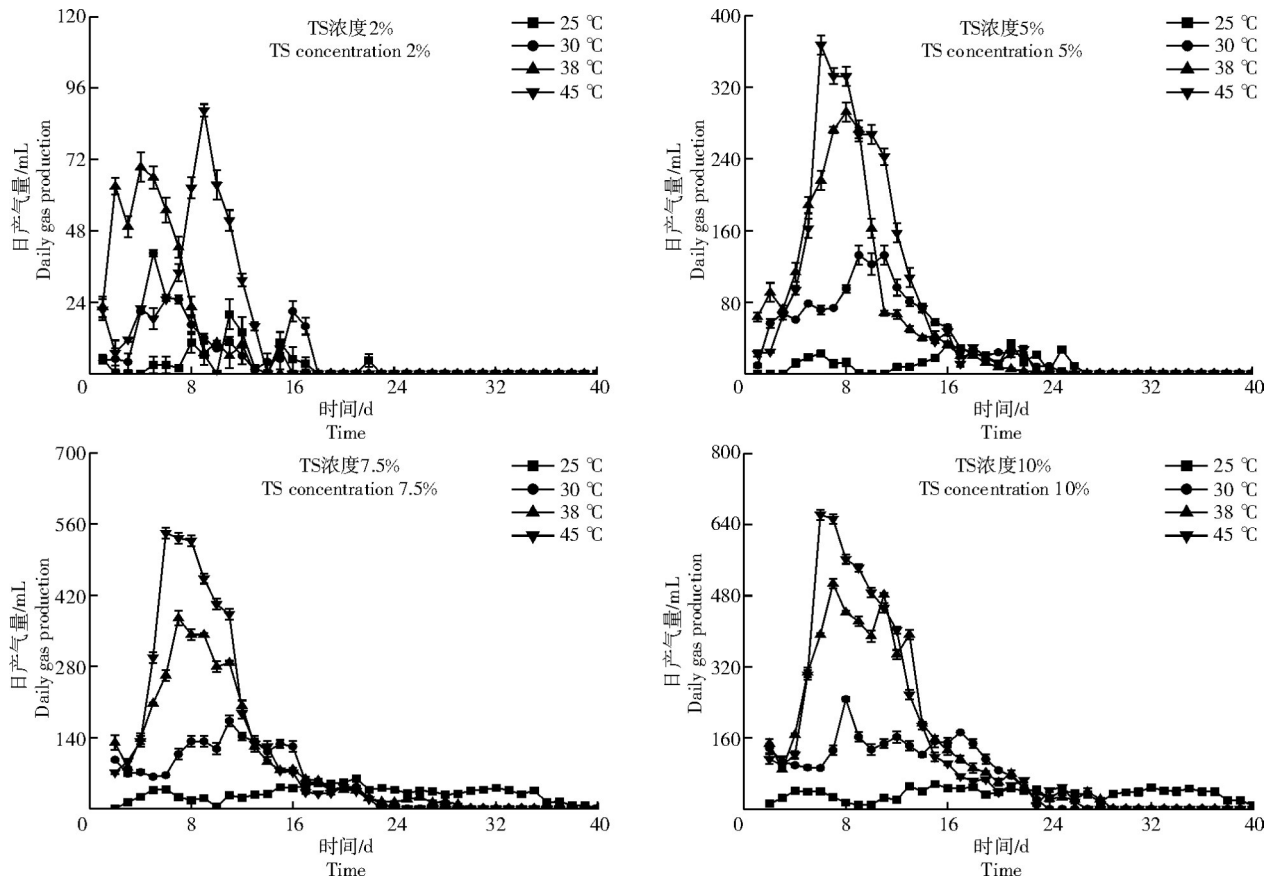


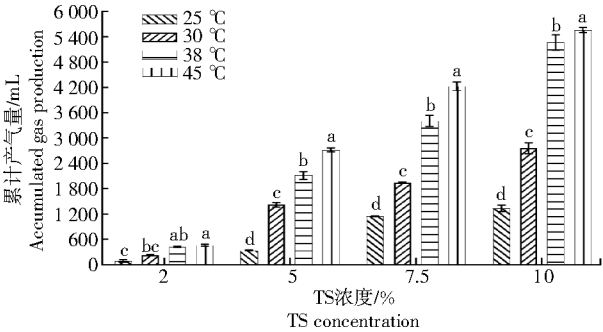
图 2 不同总固体浓度的牛粪污在不同温度下日产气量的变化

Fig.2 Daily gas production of cattle manure of different TS concentrations at different temperature

2.2 不同总固体浓度、发酵温度对牛粪污厌氧发酵累计产气量的影响

不同总固体浓度、发酵温度下牛粪污厌氧发酵的累计产气量如图 3 所示,同一 TS 浓度下,累计产气量变化趋势是随着温度升高而上升;各总固体浓度 45 ℃试验组累计产气量最大,可见在同一总固体浓度下不同的发酵温度带来的累积产气量是不同的。整体大小呈现出 45 ℃>38 ℃>30 ℃>25 ℃的趋势。在 TS 浓度为 10% 时达到了最大值,为 5 562 mL。其中,TS 浓度为 10% 时,45 ℃比 38 ℃产气量提高了 5.56%,TS 浓度为 7.5% 时,

45 ℃比 38 ℃产气量提高了 24.13%,TS 浓度为 5% 时,45 ℃比 38 ℃产气量提高了 28.64%,TS 浓度为 2% 时,45 ℃比 38 ℃产气量提高了 8.84%。TS 浓度为 2%~10% 时,随着温度的升高,除 2% 以外,TS 浓度为 5%、7.5%、10% 的累计产气量均显著增加 ($P<0.05$);且在 5%~10% 时,25~45 ℃的累计产气量均具有显著差异 ($P<0.05$)。当 TS 浓度为 2% 时,各发酵温度间没有显著差异,可能是牛粪污在低浓度发酵环境下,可降解有机物含量偏低,致使产酸菌与产甲烷菌对底物的竞争加剧。



不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$)
Different lowercase letters indicated significant difference among the different treatments ($P<0.05$)

图3 不同总固体浓度、发酵温度下牛粪污厌氧发酵的累计产气量
Fig.3 Accumulated gas production of anaerobic fermentation of cattle manure at different TS concentrations and temperature

将4种牛粪污产气量的相关数据代入修正后 Gompertz 方程,4种浓度牛粪污得到的拟合曲线图和拟合参数结果如图4、表3所示,各试验组修正后 Gompertz 方程的相关系数 R^2 均大于0.98,具有较高的拟合度。同一固体浓度下,发酵温度升高显著缩短 T_{90} 。TS浓度为2%时,45 °C的 T_{90} 为11 d,而25 °C时, T_{90} 延长至16 d。在45 °C发酵条件下,TS浓度从10%降至2%时, T_{90} 缩短了5 d;而在25 °C下,TS浓度从10%降至2%时, T_{90} 缩短了19 d,表明低温环境下浓度变化对缩短发酵周期效果更显著。发酵温度为45 °C、TS浓度为10%的 T_{90} 为16 d,高于7.5%、5%浓度的14 d,这可能与TS浓度较高,发酵体系黏度较大,微生物与底物接触受限等抑制传质效率有关,因此, λ 增加延长水解阶段,导致 T_{90} 上升。

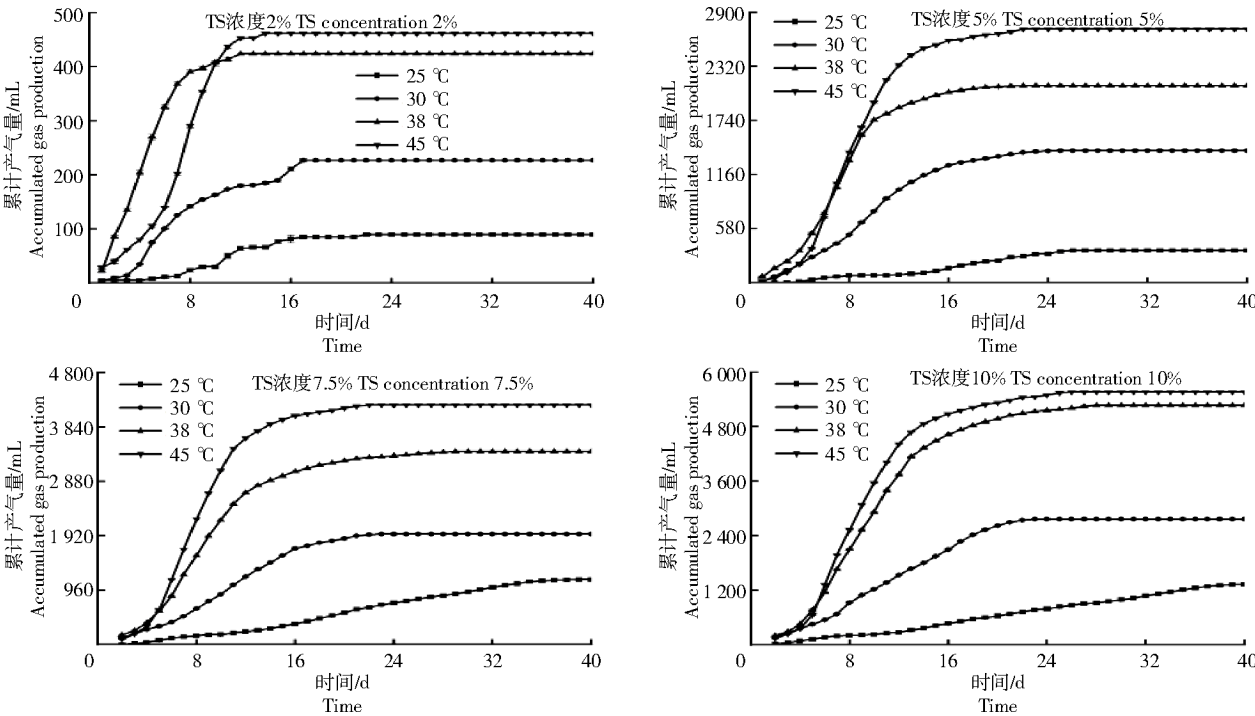


图4 Modified Gompertz 模拟拟合曲线
Fig.4 Modified Gompertz simulation fitting curve

表3 不同处理组的发酵时间 T_{90} 和 Modified Gompertz 模拟拟合参数

TS 浓度/% TS concentration	发酵温度/°C Fermentation temperature	P_m /mL	R_m /mL	λ	R^2	T_{90} /d
2	45	465.2 ± 3.4	71.1 ± 4.3	3.6 ± 0.2	0.986 6	11
	38	424.8 ± 0.7	74.3 ± 1.2	1.1 ± 0.1	0.998 6	8
	30	227.3 ± 1.7	22.2 ± 1.0	1.9 ± 0.3	0.987 8	16
	25	90.1 ± 0.7	9.6 ± 0.5	5.7 ± 0.2	0.991 5	16

续表 3 不同处理组的发酵时间 T_{90} 和 Modified Gompertz 模拟拟合参数
 Tab.3(Continued) Simulation fitting parameter of fermentation time T_{90} of different treatment groups and modified Gompertz

TS 浓度/% TS concentration	发酵温度/℃ Fermentation temperature	P_m/mL	R_m/mL	λ	R^2	T_{90}/d
5	45	$2\,720.0 \pm 4.0$	349.8 ± 3.8	4.0 ± 0.1	0.999 5	14
	38	$2\,118.2 \pm 7.1$	267.2 ± 6.7	2.9 ± 0.1	0.997 2	13
	30	$1\,433.3 \pm 5.7$	119.6 ± 2.5	3.2 ± 0.1	0.997 7	17
	25	373.2 ± 9.9	19.4 ± 1.3	6.8 ± 0.6	0.977 2	25
7.5	45	$4\,225.2 \pm 6.1$	548.3 ± 5.9	3.9 ± 0.1	0.999 5	14
	38	$3\,391.4 \pm 8.6$	332.0 ± 5.1	3.2 ± 0.1	0.998 9	17
	30	$1\,987.3 \pm 13.2$	154.0 ± 4.9	3.7 ± 0.2	0.994 7	18
	25	$1\,424.9 \pm 30.1$	42.9 ± 0.7	7.0 ± 0.2	0.997 6	33
10	45	$5\,540.6 \pm 11.9$	606.3 ± 8.5	3.9 ± 0.1	0.999 2	16
	38	$5\,273.9 \pm 9.2$	473.9 ± 4.6	3.5 ± 0.1	0.999 5	18
	30	$2\,841.7 \pm 23.3$	189.7 ± 6.4	3.3 ± 0.3	0.993 5	19
	25	$1\,803.6 \pm 58.2$	42.5 ± 0.6	5.4 ± 0.2	0.997 1	35

注: T_{90} 为物料累计产气量达到总产量 90% 所需的时间。

Note: T_{90} was time required for the accumulated gas production of materials to reach 90% of the total production.

2.3 不同总固体浓度、发酵温度对牛粪污 TS 产气率的影响

不同温度、总固体浓度下牛粪污的固体产气率如图 5 所示。

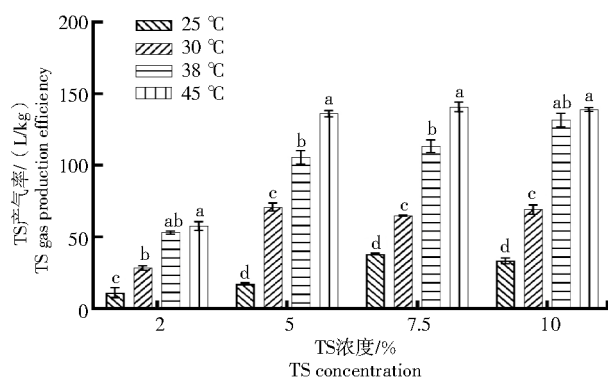


图 5 不同温度、总固体浓度下牛粪污的固体产气率
 Fig.5 Solid gas production efficiency of cattle manure at different temperature and total solid concentrations

牛粪污的 TS 产气率受发酵温度和 TS 浓度影响。如图 5 所示,在发酵温度为 25 °C、30 °C 时,7.5% TS 浓度产气率最高,而发酵温度为 38 °C、45 °C 时,产气率随浓度增加持续上升,仅 45 °C、10% 浓度下略降,与宋籽霖^[16]的研究结论相近,TS 浓度对 TS 产气率的影响不一定呈正相关,高浓度发酵可能存在有机酸累积从而影响产甲烷菌的活性。本次试验最优条件为发酵温度 45 °C、TS 浓度 7.5% 时,产气率为 140.9 L/kg,次优条件包括发酵

温度 45 °C、TS 浓度 5% 和发酵温度 38 °C、TS 浓度 10%。实际规模化工程中需结合温度控制成本与粪污浓度处理的可行性,因地制宜选择工程项目的发酵温度与发酵浓度等工艺参数以实现高效产气运行。

3 结论与讨论

3.1 针对规模化工程的厌氧系统设计

3.1.1 发酵温度 吴丽丽等^[17]研究表明,高温高浓度厌氧发酵产气速度较快,但能耗高;中温高浓度产气速度慢,但发酵周期长,工程实际中应考虑能量平衡。目前规模化牛粪沼气工程的热源主要来自沼气锅炉供热或沼气热电联产的热水或蒸汽^[18],从式(3)可以看出将单位质量的粪污加热至发酵温度所需的热量与物料所需的增温温差有关。因此,综合考虑沼气工程的物料平衡和热量平衡,建议 TS 浓度为 7.5%~10% 的高浓度粪污可采用 45 °C 的发酵温度;TS 浓度为 2%~5% 的低浓度粪污,由于单位质量粪污产气量较低,难以维持 45 °C 发酵,可选择 30~38 °C 进行发酵。

$$Q_{\text{热}} = c \times m \times \Delta T \quad (3)$$

式中, $Q_{\text{热}}$ 为升温过程中吸收的热量; c 为料液的比热容,新鲜料液质量分数约 8%,可近似水的比热, $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m 为每天进入厌氧罐的新鲜料液量 (kg); ΔT 为厌氧罐里物料增温减去初温 (°C)。

3.1.2 水力停留时间 由式(4)可知,厌氧发酵停留时间决定厌氧发酵罐的建设总容积,即影响项目的建设投资。结合试验数据和表3中的发酵时间 T_{90} 拟合数据,建议TS浓度为7.5%~10%的高浓度粪污在采用中高温45℃发酵时,停留时间应控制在14~16 d;TS浓度为2%~5%的低浓度粪污在采用中温38℃发酵时,停留时间建议控制在8~13 d。

$$V_{\text{容}} = Q_{\text{粪污}} \times T_{\text{HRT}} \quad (4)$$

式中, $V_{\text{容}}$ 为厌氧反应器的容积(m^3); $Q_{\text{粪污}}$ 为厌氧反应器的设计流量(m^3/d); T_{HRT} 为厌氧反应器的水力停留时间(d)。

3.2 不同清粪工艺的厌氧处理工艺路线选择

奶牛养殖场的清粪工艺影响后端粪污处理路线的选择。目前,大型牧场清粪工艺主要有刮板干清粪和水冲粪2种。其中,干清粪工艺产生的粪污浓度高、水量少,建议采用后分离工艺(图6-A)。经厌氧发酵后,产生的沼气可用于垫料烘干机的

热源供应,沼渣可制取再生垫料,用于牛卧床回用,从而降低养殖场前端垫料采购成本,实现粪污能源回收及资源化循环利用。水冲粪工艺产生的粪污水量大、浓度低,处理工艺宜采用前分离工艺(图6-B)。经厌氧发酵处理后,沼气可用于分布式供能供气系统,沼渣可用于农田施肥,但由于沼液量大,需配套足够的农田进行消纳。

中高温45℃厌氧发酵可以显著提升7.5%~10%TS浓度粪污的产气效率,TS浓度为7.5%时,45℃较38℃发酵提高24.13%;而TS浓度为2%时,因底物竞争抑制,温度对产气效率的影响差异不显著。基于产气动力学与传质分析,TS浓度为7.5%~10%的高浓度粪污建议采用中高温40~45℃发酵,水力停留时间14~16 d;TS浓度为2%~5%的低浓度粪污推荐中温35~38℃发酵。后续仍需探索高效的中高温区牛粪中难降解纤维的强化预处理技术以及多物料混合发酵^[20]、干发酵等^[21]技术研究,以提高牛粪发酵底物利用率与产气效率。

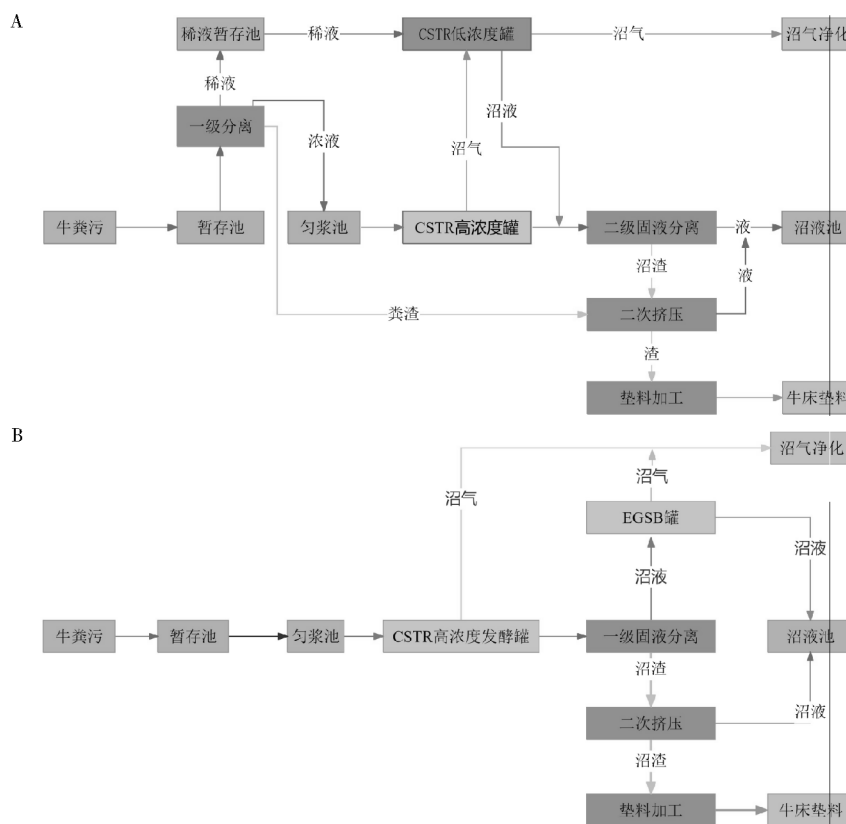


图6 高(A)、低(B)浓度牛粪污处理工艺

Fig.6 Processing diagram for cattle manure of high (A) and low (B) concentrations

综上所述,在规模化粪污处理工程中,需综合考虑供热成本与产气收益的平衡,建议干清粪工

艺的养殖场可采用粪污先厌氧后分离工艺实现沼渣资源化回用,而水冲粪清粪工艺养殖场可采用

粪污前分离工艺实现沼液农田消纳的适配方案。

参考文献:

- [1] HE T, ZHANG W Y, ZHANG H W, et al. Estimation of manure emissions issued from different Chinese livestock species: potential of future production[J]. Agriculture, 2023, 13(11): 2143.
- [2] ZHANG C S, XIAO G, PENG L Y, et al. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure[J]. Bioresource Technology, 2013, 129: 170-176.
- [3] BRADLEY A J, LEACH K A, GREEN M J, et al. The impact of dairy cows' bedding material and its microbial content on the quality and safety of milk-A cross sectional study of UK farms[J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 269: 36-45.
- [4] LU B Y, JIA M Y, PEI Z J, et al. Process optimization and feature analysis of an anaerobic fermentation microbial community in a cold region[J]. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2022, 34(1): 1-11.
- [5] 习彦花, 王馨芝, 李旭, 等. 高温强化牛粪高浓度厌氧发酵协同抗生素抗性基因削减[J]. 中国沼气, 2024, 42(3): 22-28.
- [6] 庞震鹏, 李永平, 朱敦宁, 等. 温度对牛粪与番茄秸秆厌氧发酵产气的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(8): 1338-1343.
- [7] 楚莉莉, 田孝鑫, 杨改河. 接种量和发酵温度对牛粪厌氧发酵的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(2): 147-150.
- [8] 卞永光, 李范儒. 固体物浓度温度对农业废弃物厌氧发酵影响研究[J]. 现代工程科技, 2022(1): 93-95.
- [9] 邢向欣, 张蕾蕾, 张重. 固体物浓度温度对农业废弃物厌氧发酵影响研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(24): 40-42.
- [10] 李月中, 宫亚斌, 谭婧, 等. 提升中温和高温过渡区厌氧发酵效率的试验研究和工程验证[J]. 中国沼气, 2021, 39(2): 51-56.
- [11] 宫亚斌, 姚建刚, 谭婧. 餐厨垃圾中温与中高温过渡区厌氧产沼效率研究[J]. 环境工程, 2022, 40(3): 132-138.
- [12] LIU R, GONG H, XU Y, et al. The transition temperature (42 °C) from mesophilic to thermophilic micro-organisms enhances biomethane potential of corn stover[J]. Science of The Total Environment, 2021, 759: 143549.
- [13] ZHAO C X, MO J F, QIN Y, et al. Semi-thermophilic anaerobic digestion (41-49 °C): a review of its potential for enhanced methane production and system stability[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 215: 115630.
- [14] 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(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] HUPFAUF S, PLATTNER P, WAGNER A O, et al. Temperature shapes the microbiota in anaerobic digestion and drives efficiency to a maximum at 45 °C[J]. Bioresource Technology, 2018, 269: 309-318.
- [16] 宋籽霖. 不同温度下总固体浓度对厌氧发酵产气特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [17] 吴丽丽, 刘天舒, 黄希国, 等. 牛粪高浓度批次厌氧发酵试验研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(2): 225-228.
- [18] 宣圣吉, 陈丽萍, 陈珊珊. 规模化奶牛场粪污无害化处理及资源化利用案例[J]. 畜牧产业, 2021(6): 27-30.
- [19] 张钧, 王月, 黄培操, 等. 牛粪水稻秸秆厌氧共发酵产沼气操作参数优化[J]. 天津农学院学报, 2017, 24(1): 58-61.
- [20] 于佳动, 赵立欣, 冯晶, 等. 序批式秸秆牛粪混合厌氧干发酵影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 215-221.
- [21] YU J D, ZHAO L X, FENG J, et al. Influence factors of batch dry anaerobic digestion for corn stalks-cow dung mixture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 215-221.