

孔德望, 宋香育, 张克强, 等. 渗滤液回流和分层接种对猪粪厌氧干发酵的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 300–305.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.14.069

渗滤液回流和分层接种对猪粪厌氧干发酵的影响

孔德望^{1,2}, 宋香育¹, 张克强¹, 梁军锋¹, 高文莹¹, 梁雨¹, 杜连柱¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁沈阳 110866)

摘要:以降低厌氧干发酵过程挥发性有机酸(VFAs)积累、提高产气性能为目的, 研究渗滤液回流、分层接种及 2 种处理组合的工艺措施对猪粪添加蛭石体系中温(37 ℃)发酵性能的影响。结果表明, 渗滤液回流能够降低发酵体系中的 VFAs 和氨氮质量分数, 各组 VFAs 质量分数均低于 0.80 mg/g, 分层接种条件下回流组总 VFAs 和乙酸质量分数均低于不回流组; 氨氮质量分数随时间延长逐渐升高, 38 d 时各处理组质量分数分别为 2.72、2.95、2.79 mg/g, 均低于对照组(3.06 mg/g), 整个过程中两回流组氨氮质量分数均低于对应不回流组; 渗滤液回流组的累积挥发性物质(VS)甲烷产量为 212.0 mL/g, 分别比其他 3 个处理组高 6.1%、8.4% 和 9.9%, 由修正的 Gompertz 方程预测得到最大累积 VS 产甲烷量、最大产甲烷速率和达到最大累积 VS 甲烷产量 90% 所需的时间(T_{90})分别为 207.7 mg/g、14.9 mL/(g·d) 和 19.8 d, 均优于其他处理组; 分层接种与不分层接种的累积 VS 产甲烷量在前 10 d 差异极显著($P < 0.01$), 在前 20 d 差异显著($P < 0.05$), 末期无显著差异。

关键词:厌氧发酵; 猪粪; 渗滤液回流; 分层接种

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)14-0300-06

近年, 我国畜禽养殖业迅猛发展, 畜禽粪便量也随之激增, 2011 年产生总量约为 25.45 亿 t, 其中清运量仅占 0.90%, 有相当大比例的畜禽粪便未得到有效处理^[1-2], 不仅浪费了资源, 而且造成严重的空气污染、氮磷及重金属污染、抗生素的迁移和病原菌扩散等危害^[3-5]。厌氧干发酵因其产生清洁能源、能耗低、有机负荷高等优点, 被广泛地应用于畜禽粪便、农作物秸秆等农业废弃物的处理^[6-7], 但在实际应用中, 仍存在启动慢、传质差、难搅拌、酸积累和运行不稳定等问题^[8-10]。

针对以上问题, 国内外学者开展了众多研究, 其中渗滤液回流是研究的重点。该工艺能提高发酵罐内底物质量分数和微生物总量, 并加强底物、微生物与水分间的相互接触和作用, 提高系统缓冲能力和产气量, 对于湿发酵同时能实现沼液

减排, 降低后续深度处理的压力^[11-12]。徐霄等以干稻草和猪粪为原料, 比较不回流、每天回流、产气趋势下降后回流以及两相法回流等 4 种方式, 发现回流处理的总产气量较不回流对照分别提高了 9.53%、23.13% 和 12.74%, 其中, 以产气趋势下降后再回流的方式为最优, 表明回流能将底物中局部积累的酸冲洗、溶解至滤液, 明显提高产气率^[13]; 王馨仪等在对餐厨垃圾的沼液回流试验中发现, 30% 的回流比使系统日平均产气量提高 13.0%, 在反应后 15 d, 不同回流比下的挥发性有机酸(VFAs)平均值均低于不回流组, 回流能使 VFAs 降解更充分, 提高系统的缓冲能力^[14]。

在渗滤液回流的同时, 袁巧霞等在反应器内部增加分层床, 对发酵原料进行分层, 结果表明, 分层对累计产气量、最大产气量及甲烷体积分数等均有显著影响, 当床层厚度由 250 mm 降为 150 mm 时, 累计产气率由 135.7 mL/g 增加到 172.1 mL/g, 提高了 26.8%^[15]。作为一种吸附材料, 聂发辉研究了蛭石对污水中氨氮的吸附作用, 发现蛭石具有较高的吸附容量, 饱和吸附量为 20.83 mg/g^[16]; 但是蛭石应用于厌氧发酵中鲜有报道, 宋香育的前期研究表明, 将蛭石添加在猪粪中进行发酵, 能增加体系游离水含量、提高传质效率和微生物的繁殖速率、避免酸积累^[17]。另外, 蛭石作为一种土壤改良剂能降

收稿日期: 2018-03-26

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2017YFD0800801)。

作者简介: 孔德望(1990—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: hnkongdewang@126.com。

通信作者: 杜连柱, 博士, 副研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: dulianzhu99@163.com。

质因子及原核与真核微生物的动态变化[J]. 中国水产科学, 2014, 21(1): 75–83.

[19] 王蓉, 黄天寅, 吴玮. 典型城市河道氮、磷自净能力影响因素[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 105–113.

[20] 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 等. 周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2149–2157.

[21] 徐华兵, 王龙乐, 曾权辉, 等. 水下 LED 光照对凡纳滨对虾养殖水体环境因子和浮游植物群落变化的影响[J]. 生态科学, 2017, 36(5): 24–27.

[22] 张晶晶, 周进, 张怀瑾, 等. 不同营养条件下铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和小球藻(*Chlorella vulgaris*)的生长竞争行为[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(5): 1013–1023.

[23] Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, et al. Commercial applications of microalgae[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(2): 87–96.

[24] 汤佩武, 李勤慎, 刘哲, 等. 基于生物絮团技术的糖蜜添加对西北盐碱池塘水质和浮游生物的影响[J]. 淡水渔业, 2014, 44(2): 83–88.

低植物对重金属的吸收^[18],有利于沼渣的后续农用。

因此,本试验在前期研究的基础上,于猪粪中添加适量的蛭石,研究渗滤液回流和分层接种对厌氧干发酵的影响,为猪场粪污的厌氧发酵处理提供数据支持。

1 材料与方法

表 1 原料和接种物特性

原料和接种物	干物质(TS)含量 (%)	挥发性物质(VS) 含量(%)	总凯氏氮(TKN) 含量(mg/g)	总有机碳(TOC) 含量(mg/g)	C/N	pH 值
猪粪	31.9±0.8	74.7±0.3	34.5±1.4	455.4±36.3	13.2	7.6
蛭石	98.2±0.2	1.7±0.4	—	—	—	—
接种物	18.5±0.1	66.5±0.9	—	—	—	8.3

1.2 试验设计

厌氧发酵试验于 2012 年 6 月 21 日至 2012 年 7 月 27 日,在农业部环境保护科研监测所(天津市南开区)的恒温发酵室中进行。试验设计见表 2,4 种发酵方式均以猪粪和蛭石混合物为底物(干物质质量比为 3:1),接种率为 30%(以 TS 计, $m_{\text{接种物}}/m_{\text{发酵体系}}=0.3$),总进料量为 850 g(TS 含量为 20%),每种发酵方式 3 个重复。 T_0 为对照组; T_R :渗滤液收集于反应器底部,每 3 d 回流 1 次; T_L :接种物和发酵底物不混合,依次分 3 层进料; T_{LR} :接种物和底物依次分 3 层进料,渗滤液收集于反应器底部,每 3 d 回流 1 次。进料结束后向各反应器中通入氮气,排除残余的空气,创造厌氧环境,最后将反应器置于(37±1)℃恒温发酵室内进行发酵。

表 2 试验设计

处理	原料	处理方式
T_0	猪粪+蛭石	—
T_R	猪粪+蛭石	渗滤液回流
T_L	猪粪+蛭石	分层接种
T_{LR}	猪粪+蛭石	分层接种+渗滤液回流

每日测量产气量、甲烷及二氧化碳的体积分数;每 3 d 采集消化样品,测量 pH 值、VFAs 和氨氮等指标,分层接种的反应器采集底部的渗滤液测量以上指标,以避免分层结构被破坏。

1.3 试验装置

试验采用有效容积为 1 L 的有机玻璃材质的立式反应器(图 1),其中 T_R 和 T_{LR} 反应器距底部 5 cm 处安装孔径为 1.0 mm 的可摘卸多孔滤板,产生的渗滤液通过滤板进入收集室用于回流, T_0 和 T_L 反应器不放置滤板。

1.4 分析方法

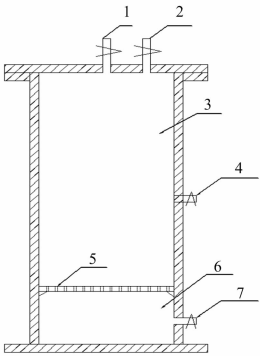
干物质质量和挥发性物质采用重量法测定,溶解性化学需氧量(SCOD)采用重铬酸钾法测定,氨氮质量分数采用滴定法测定,总有机碳(TOC)含量采用总有机碳分析仪(德国元素)测定^[19];pH 值:样品稀释 10 倍后用 pH 计(Mettler-Toledo)测定;气体产量用湿式气体流量计测量,CH₄ 和 CO₂ 的百分含量及挥发性有机酸(VFAs,乙酸、丙酸、丁酸、戊酸)质量分数采用前期试验的处理及分析方法^[17]。

1.5 累积产甲烷曲线拟合

对于批次厌氧发酵产甲烷过程,甲烷产量一定程度上是微生物生长的函数,本试验采用修正的 Gompertz 方程(式 1)

1.1 试验材料

猪粪和蛭石取自天津市某养殖有限公司,取当日产鲜猪粪冷藏于(4±1)℃的冰箱中,20~40 目的蛭石储存于阴凉干燥处。消化污泥取自天津市某牧业有限公司稳定运行的中温厌氧发酵反应器,离心(10 000 r/min,20 min)后的固体作为接种物。原料和接种物特性见表 1。



1—渗滤液回流入口;2—排气口;3—发酵室;4—固体取样口;5—多孔渗滤板;6—渗滤液收集室;7—渗滤液排出口

图1 发酵装置结构

对累积 VS 产甲烷量进行拟合,通过试验数据的拟合,可以得到最终甲烷产量、最大产甲烷速率和迟滞期^[20]。

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

式中: M 为 t 时刻的累积 VS 甲烷产量,mL/g; P 为最终 VS 甲烷产量,mL/g; R_m 为最大 VS 产甲烷速率,mL/(g·d); λ 为迟滞期,d。

2 结果与分析

2.1 产甲烷特性

由图 2 可知沼气中甲烷的体积分数、每日 VS 产甲烷量和累积 VS 产甲烷量的变化趋势,而表 3 显示了各处理累积 VS 产甲烷量差异显著性。其中,各处理的产甲烷规律相似,在甲烷的体积分数上,对照组在 6 d 达到 50%,而 T_R 、 T_L 和 T_{LR} 处理分别为 5、5、4 d,表明 3 种处理均能够在发酵初期快速提高甲烷的含量,15 d 后甲烷体积分数均低于 50% 并开始逐渐下降,表明体系中还有大量的物质没有降解,同时,日 VS 产甲烷量开始下降,累积 VS 产甲烷量也基本达到稳定。日 VS 产甲烷量在 5、12 d 前后为 2 个产气高峰期。

渗滤液回流组 T_R 的 37 d 累积 VS 产甲烷量为 212.0 mL/g,分别比 T_0 、 T_L 和 T_{LR} 高 6.1%、8.4% 和 9.9%;同时,日 VS 产甲烷量在前 15 d 也高于其他组,2 个高峰日的 VS 甲烷产量分别为 15.9、17.6 mL/(g·d),由此可知,渗滤液回流能适当提高产气性能^[21],但差异不明显,可能由于本试验把 3 d 累积产生的渗滤液全部回流,未达到最佳回流比和时间。

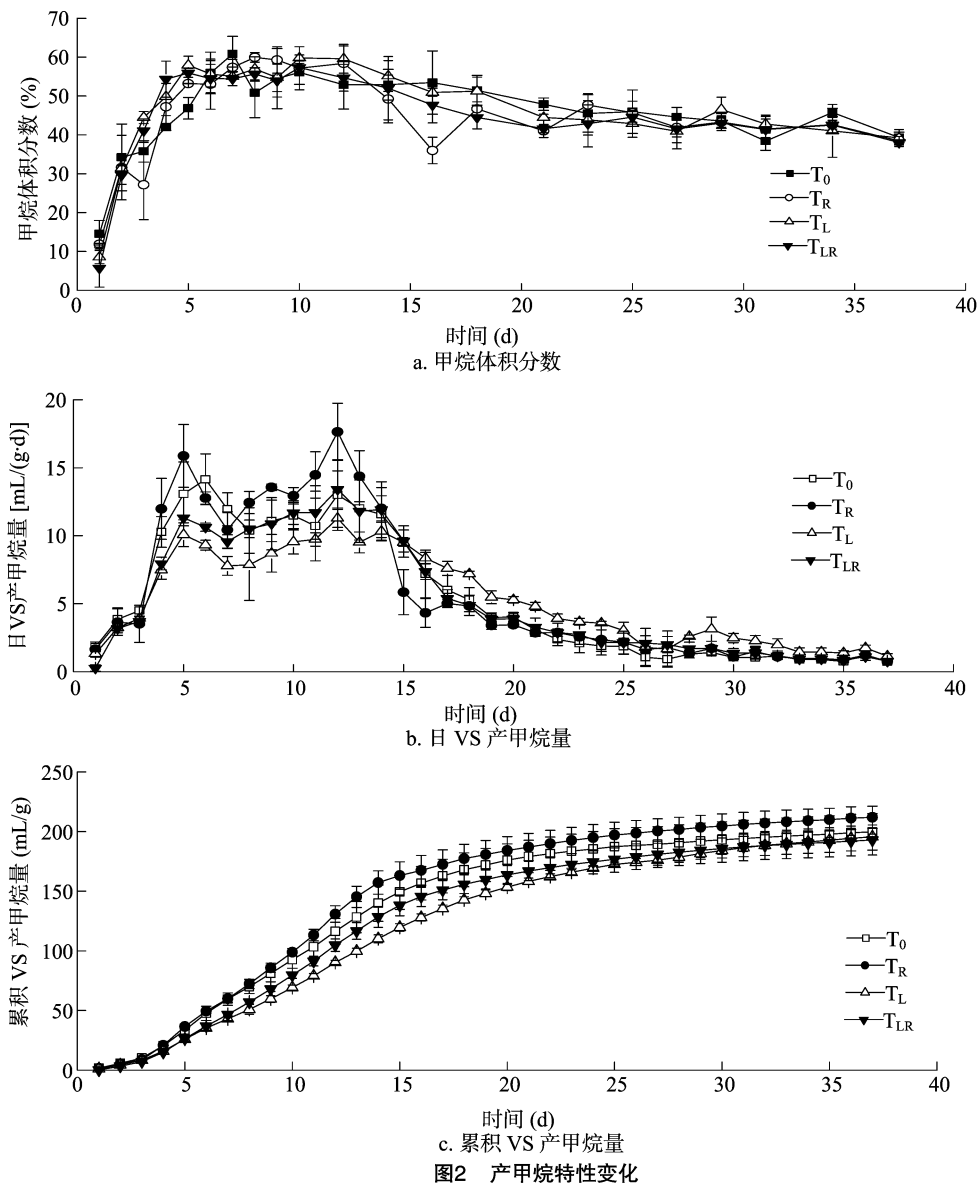


图2 产甲烷特性变化

分层接种的 2 组 (T_L 、 T_{LR}) 累积 VS 产甲烷量相当且最低, T_{LR} 组日产甲烷量仅在 4 ~ 15 d 高于 T_L , 由此可见, 渗滤液回流对分层处理的产气效率也有一定的提高, 但效果甚微。由表 3 可知, T_L 与 T_0 、 T_R 和 T_{LR} 在前 20 d 累积 VS 产甲烷量存在显著差异 ($P < 0.05$), 之后差异性不显著, 表明分层接种对厌氧干发酵前期有一定影响, 后期可能由于接种物和底物的

相互渗透, 使得差异性不显著。宋香育等在猪粪秸秆混合干发酵研究中发现, 分层接种使累积 VS 产甲烷量提高 16.7%^[22], 而本试验没有出现同样的结果, 可能是由于蛭石的添加导致发酵体系中游离水的含量增加, 发酵底物的状态较稀, 层状结构容易被破坏, 因此总的产气效果反低于不分层的发酵体系。

表 3 累积 VS 产甲烷量的差异显著性分析

处理	累积 VS 产甲烷量 (mL/g)			
	4 d	10 d	20 d	28 d
T_0	20.5 ± 2.1a	92.6 ± 7.2a	176.0 ± 13.8a	190.6 ± 15.0a
T_R	20.8 ± 0.0a	98.8 ± 3.2a	184.2 ± 11.6a	201.8 ± 10.1a
T_L	16.0 ± 0.9b	69.3 ± 2.1c	153.5 ± 3.0b	178.6 ± 4.4a
T_{LR}	15.1 ± 0.5b	79.7 ± 2.7b	163.6 ± 8.0ab	182.6 ± 11.2a
F 值	15.37	23.46	4.97	2.09
P 值	<0.01	<0.01	<0.05	>0.05

2.2 pH 值和 VFAs 质量分数变化

由图 3、图 4 可知试验中 pH 值和 VFAs 质量分数变化趋

势, 由图 5 可知各处理的乙酸变化趋势一致, 前 13 d 含量均偏低, 与宋香育等研究的猪粪厌氧干发酵过程中前 9 d 的乙

酸变化情况^[22]相似,这是由于30%的接种率为发酵体系提供了充足的产甲烷菌,水解产生的乙酸未积累。随着反应进行,水解产酸菌的生长速度超过产甲烷菌^[23],乙酸质量分数不断增加,并在16~34 d维持在相对较高水平,之后快速下降。总 VFAs 质量分数在整个反应过程,均低于已报道的抑制质

量分数1.0 mg/g^[23],表明该试验过程无明显酸积累现象。对比图3发现,4组处理的pH值变化均呈现缓慢上升的趋势,与总 VFAs 质量分数的变化相反,可见虽然固态样品稀释后测量pH值会产生一定偏差,但总体变化规律仍可以反映发酵体系中 VFAs 的利用和积累情况。

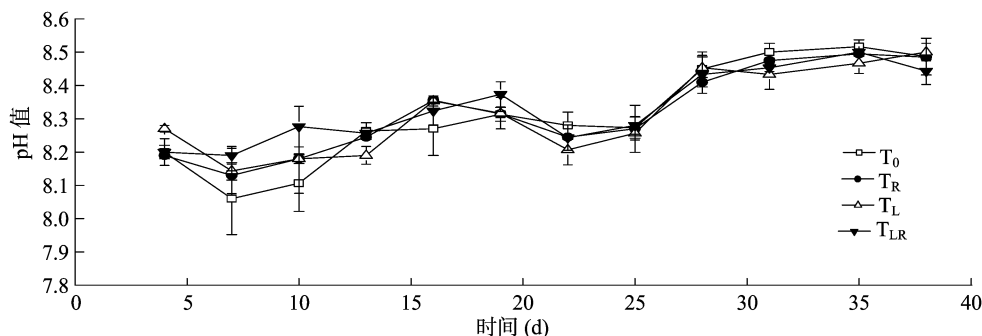


图3 试验过程中 pH 值变化情况

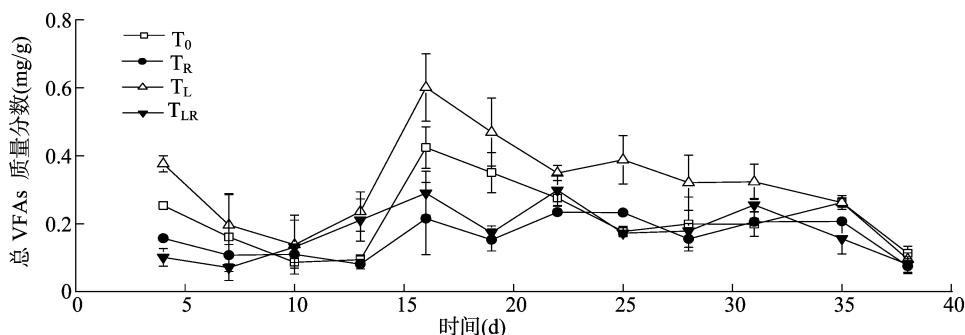


图4 试验过程中 VFAs 质量分数的变化

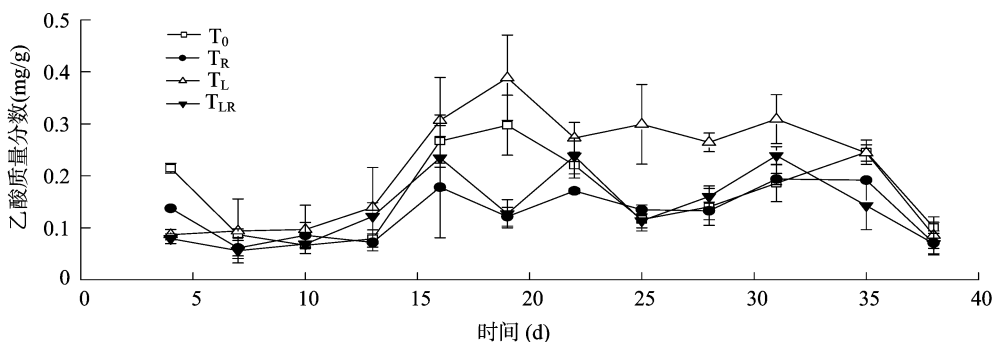


图5 试验过程中乙酸质量分数的变化

在 T₀ 对照组中,处理 16 d 的总 VFAs 质量分数达到最高(0.42 mg/g),但是 pH 值未出现明显的下降,在 8.1~8.2 之间,可能是由于猪粪厌氧发酵体系中较强的缓冲作用^[24]。乙酸质量分数在处理 4 d 时为 0.21 mg/g,之后降低到 0.07~0.09 mg/g 的范围内,在处理 16 d 后升高到 0.30 mg/g,略低于分层接种处理,与其他 2 组处理保持在一个水平。

在回流处理(T_R)的发酵过程中,总 VFAs 和乙酸质量分数分别在 0.07~0.24 mg/g 和 0.06~0.20 mg/g 范围内变化,处于比较稳定的状态,除处理 10 d 前后,均低于对照组。同时对照图 2-b,在 4~14 d,渗滤液回流的 2 组(T_R 和 T_{LR})日产甲烷量均对应高于不回流组,可以看出渗滤液回流有助于加快发酵体系的传质速率,促进挥发性有机酸向甲烷的快速转化^[25]。

在分层处理(T_L)中,总 VFAs 质量分数在 0.09~0.60 mg/g 内变化。乙酸质量分数在处理 16 d 以后高于其他 3 组处理,在 0.26~0.40 mg/g 的范围内,可能是由于分层处理在接种物和底物的接触面附近产生高质量分数的乙酸,使该区域的微生物处于抑制状态^[26]。

渗滤液回流和分层接种结合的处理(T_{LR})中,整个发酵过程中总 VFAs 质量分数在 0.07~0.30 mg/g 的范围内变化,低于分层接种处理(T_L),证明在分层接种的基础上,回流对降低乙酸质量分数具有较好效果。

2.3 氨氮质量分数的变化

氨氮是厌氧发酵过程中的重要指标之一,质量分数过高时会抑制微生物的产甲烷作用。以往关于氨胁迫的研究多集中于湿发酵过程,同样它也存在于干发酵中,陈闯等对猪粪的

厌氧干发酵研究表明,氨氮质量分数大于 2.3 mg/g 时,会出现明显的产气抑制^[27];蒋建国等对厨余垃圾的高固体厌氧消化结果表明,前期氨氮质量分数超过 1.7 mg/g 时,系统呈现氨氮抑制状态,随着微生物被驯化,系统抵抗力增强,随着氨氮质量分数升高至 3.0 mg/g 时,系统状态反而较为良好^[28]。

由图 6 可知,从发酵开始到结束,各处理组的氨氮质量分数均逐渐上升,在前 15 d 上升速度较快,15 d 后逐渐趋于稳定,最高质量分数为 3.06 mg/g ,结合产甲烷特性可知,发酵体系未发生明显的氨抑制现象,可能是因为蛭石对氨氮具有

较强的离子阳离子交换性^[16],使得体系中的氨氮质量分数降低,还有可能是由于干发酵传质效率低造成的。 T_0 组和 T_L 组的氨氮质量分数基本处于同一水平,在发酵过程中,氨氮质量分数分别从 1.69 、 1.83 mg/g 升高至 3.06 、 2.95 mg/g ,在有渗滤液回流处理的发酵组中(T_R 和 T_{LR}),氨氮质量分数分别从 1.69 、 1.74 mg/g 升高至 2.72 、 2.79 mg/g ,并且整个过程中两回流组的氨氮质量分数始终低于对应的不回流组,表明渗滤液回流能明显降低体系的氨氮质量分数。

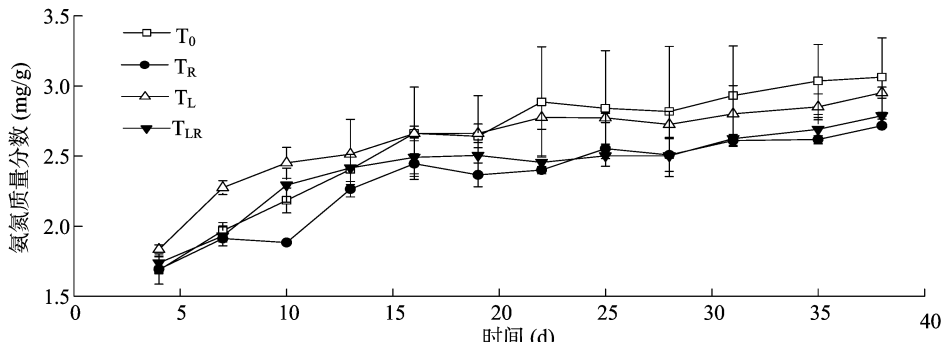


图6 试验过程中氨氮质量分数变化

2.4 SCOD 的变化

由图 7 可知,各组 SCOD 除处理 3 d 外,均处于同一水平,且缓慢下降,与后期甲烷含量缓慢下降相一致。 T_0 处理

的 SCOD 质量分数在处理 3 d (11.00 mg/g) 前后高于回流处理,低于分层接种的 2 个处理,由此可见,发酵初期分层处理水解效率较高,此时渗滤液尚未回流,SCOD 较低。

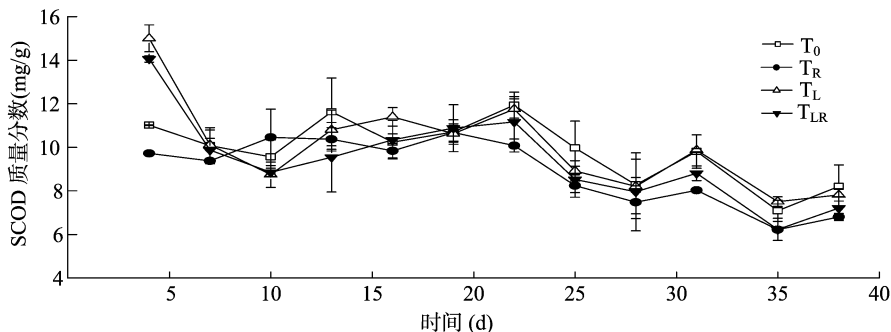


图7 试验过程中 SCOD 的变化

2.5 产甲烷动力学

采用修正的 Gompertz 方程对 4 组发酵的累积 VS 产甲烷量进行拟合,见图 8、表 4。各组的拟合曲线均呈现很高的拟合度,因此修正的 Gompertz 方程可用于模拟预测发酵体系的相关参数。渗滤液回流的 2 组(T_R 、 T_{LR}) T_{90} 分别为 19.8、21.5 d,均低于对应的不回流组(T_0 、 T_L);回流组(T_R)的预测

VS 最大产甲烷量和最大产甲烷速率最大,分别为 207.7 mL/g 和 $14.9 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{d})$,但对比 T_L 和 T_{LR} 发现,除 T_{90} 外回流组均无明显优势。由此可见,猪粪添加蛭石的厌氧干发酵中,渗滤液回流能缩短发酵周期,提高底物和接种物混合发酵体系产气性,但对分层接种发酵效率无促进作用。

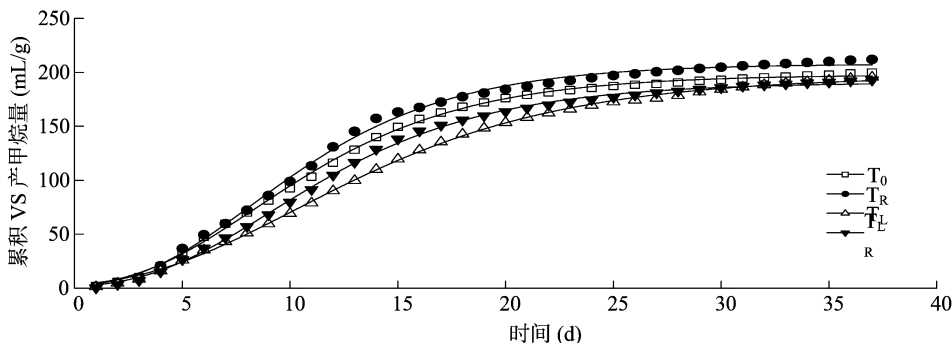


图8 累积 VS 产甲烷量的修正 Gompertz 方程拟合曲线

表 4 修正的 Gompertz 方程参数

处理	P (mL/g)	R_m [mL/(g·d)]	λ (d)	R^2	T_{90} (d)
T_0	197.8	13.2	2.8	0.999	20.7
T_R	207.8	14.7	3.0	0.998	19.8
T_L	196.7	10.2	3.1	0.999	26.0
T_{LR}	190.6	12.4	3.4	0.999	21.5

注: T_{90} 为达到最大累积 VS 甲烷产量 90% 所需的时间。

3 结论

渗滤液回流能够降低厌氧干发酵体系中的 VFAs 和氨氮质量分数,缩短发酵周期,提高底物和接种物混合体系 VS 产气率,但分层接种发酵中渗滤液回流对本试验的产气性能无提升作用。

发酵前期分层接种和不分层组的累积甲烷产量存在显著性差异,后期逐渐变小至无显著性差异,分层对厌氧发酵的的甲烷体积分数没有明显影响。

Gompertz 方程是针对厌氧湿发酵开发的,但经过修正后同样能对添加蛭石的猪粪厌氧干发酵过程表现很好的拟合效果,因此修正的 Gompertz 方程可用于预测厌氧干发酵过程的相关参数。

参考文献:

- [1] 朱建春,张增强,樊志民,等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报,2014,33(3):435-445.
- [2] 耿维,胡林,崔建宇,等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报,2013,29(1):171-179.
- [3] 常志州,黄红英,靳红梅,等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——氮磷养分循环利用技术[J]. 农业环境科学学报,2013,32(10):1901-1907.
- [4] 孔源,韩鲁佳. 我国畜牧业粪便废弃物的污染及其治理对策的探讨[J]. 中国农业大学学报,2002,7(6):92-96.
- [5] 王霜,邓良伟,王兰,等. 猪粪粪污中重金属和抗生素的研究现状[J]. 中国沼气,2016,34(4):25-33.
- [6] Rajagopal R, Massé D I, Singh G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia [J]. Bioresour Technol,2013,143:632-41.
- [7] 路朝阳,汪宏杰,于景民,等. 农村废弃物厌氧干发酵技术研究进展[J]. 河南化工,2015,32(2):7-11.
- [8] 李强,曲浩丽,承磊,等. 沼气干发酵技术研究进展[J]. 中国沼气,2010,28(5):10-14.
- [9] 祝其丽,何明雄,汤晓玉,等. 有机固体废弃物干发酵产沼气研究进展[J]. 中国农学通报,2013,29(18):21-26.
- [10] Kothari R, Pandey A K, Kumar S, et al. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: an overview [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2014,39:174-195.
- [11] 李超,周瀛,刘刚金,等. 基于渗滤液回流的干式厌氧发酵研究进展[J]. 可再生能源,2016,34(11):1727-1738.
- [12] 倪萍,孙昊,吴树彪,等. 大中型农业沼气工程沼液循环回用影响分析[J]. 可再生能源,2017,35(4):482-488.
- [13] 徐霄,叶小梅,常志州,等. 秸秆干式厌氧发酵渗滤液回流技术研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(6):1273-1278.
- [14] 王馨仪,郭建斌,吴树彪,等. 发酵液回流对餐厨垃圾厌氧消化的影响[J]. 环境工程,2012,30(5):77-81.
- [15] 袁巧霞,程长菊,华朝辉,等. 渗滤液回流条件下多层床厌氧干发酵产气特性[J]. 农业机械学报,2014,45(2):182-187.
- [16] 聂发辉,吴晓芙,胡日利. 人工湿地中蛭石填料净化污水中氨氮能力[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(6):280-282.
- [17] 宋香育. 猪粪厌氧干发酵在不同调控措施下的发酵特性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2017.
- [18] Malandrino M, Abollino O, Buoso S, et al. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite [J]. Chemosphere,2011,82(2):169-178.
- [19] 国家保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002:211-281.
- [20] 李东,孙永明,袁振宏,等. 有机垃圾组分中温厌氧消化产甲烷动力学研究[J]. 太阳能学报,2010,31(3):385-390.
- [21] 杜静,朱德文,钱玉婷,等. 导气措施与渗滤液回流方式对干发酵产沼气影响中试[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):143-148.
- [22] 宋香育,张克强,房芳,等. 工艺措施对猪粪秸秆混合厌氧干发酵产气性能的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(11):233-239.
- [23] Li D W, Zhou T, Chen L, et al. Using porphyritic andesite as a new additive for improving hydrolysis and acidogenesis of solid organic wastes [J]. Bioresour Technol,2009,100(23):5594-5599.
- [24] 杨红男,邓良伟. 不同温度和有机负荷下猪场粪污沼气发酵产气性能[J]. 中国沼气,2016,34(3):36-43.
- [25] Veecken A H M, Hamelers B V W. Effect of substrate-seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of biowaste [J]. Water Science Technology,2000,41(3):255-262.
- [26] Martin D J, Potts L G, Heslop V A. Reaction mechanisms in solid-state anaerobic digestion: I. the reaction front hypothesis [J]. Process Safety and Environmental Protection,2003,81(3):171-179.
- [27] 陈闯,邓良伟,信欣,等. 上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究[J]. 环境科学,2012,33(3):1033-1040.
- [28] 蒋建国,王岩,隋继超,等. 厨余垃圾高固体厌氧消化处理中氨氮浓度变化及其影响[J]. 中国环境科学,2007,27(6):721-726.