

应用 Modified Gompertz 模型对城市生活垃圾沼气发酵的拟合研究

李建昌^{1,2}, 孙可伟^{1*}, 何娟¹, 吴勇生¹

(1. 昆明理工大学固体废弃物资源化国家工程中心, 昆明 650031; 2. 云南师范大学可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 昆明 650092)

摘要: 尽管 Modified Gompertz 模型与料菌比和发酵浓度之间没有直接的函数和变量关系, 但是料菌比和浓度的变化必然导致 Modified Gompertz 模型参数的改变, 因此可以通过 Modified Gompertz 模型参数的变化特征对料菌比和发酵浓度是否适宜作出合理的评价. 据此本研究将采用中温批量发酵, 分别设计单因素实验和多因素均匀设计 (Uniform Design) 实验, 并利用 Modified Gompertz 模型拟合的方法, 同时考察料菌比和发酵浓度对城市生活垃圾批量沼气发酵的影响. 结果表明, 累积产气量随时间的变化与 Modified Gompertz 模型具有较好的相关性, 从而获得最大累积产气量、最大产气速率和滞留时间模型参数, 并由此推算出 VS 产气率及产气速率等评价指标. 这些参数和指标的变化特征表明, 发酵含量是影响最大累积产气量、最大产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率的主要因素, 而料菌比的影响相对较小, 特别是对 VS 产气率和 VS 产气速率几乎不产生影响, 并表明城市生活垃圾沼气发酵的 VS 含量在 4% ~ 8% 比较适宜, 料菌比在 1.5:1 ~ 2.5:1 比较适宜.

关键词: Modified Gompertz 模型; 城市生活垃圾; 沼气发酵; 料菌比; 发酵含量; 挥发性固体

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)06-1843-08

Application of Modified Gompertz Model to Study on Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste

LI Jian-chang^{1,2}, SUN Ke-wei¹, HE Juan¹, WU Yong-sheng¹

(1. National Engineering Center of Solid Waste Resources Recovery, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Key Laboratory of Advanced Technique and Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: Although there was not direct correlation between modified Gompertz model (MGM) and ratio of feedstock to inoculum (RFI) and fermentative concentration (FC), the changes of RFI and FC absolutely resulted in the change of MGM's parameters, so it could make a suitable estimation for RFI and FC by means of the characteristic value of MGM's parameters. Based on this theory, MGM was used to investigate the effect of both RFI and FC on batch mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) by using single-factor experiment and Uniform Design multi-factor experiment. The results showed that accumulative biogas yield as a function of time had a strong excellent correlation with MGM from which kinetic parameters of anaerobic digestion, such as the maximum accumulative biogas yield, the maximum biogas rate, lag-phase time, biogas potential of VS, and biogas rate of VS, could be directly or indirectly obtained. The characteristics of these kinetic parameters indicated that fermentative concentration had a greater influence on the maximum accumulative biogas yield, the maximum biogas rate, biogas potential of VS, and biogas rate of VS, while the ratio of feedstock to inoculum had a less or no impact on those parameters, especially biogas potential of VS and biogas rate of VS. It also indicated that the optimum VS concentration for anaerobic digestion of OFMSW was 4% - 8% and ratio of feedstock to inoculum was 1.5:1 - 2.5:1.

Key words: Modified Gompertz model; organic fraction of municipal solid waste; anaerobic digestion; ratio of feedstock to inoculum; fermentative concentration; volatile solid (VS)

据估计,我国城市人均年产生生活垃圾 440 kg,且以年均 8% ~ 10% 的速度增长,城市生活垃圾的积存量约 $60 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$. 如此巨大的垃圾积存量,不仅侵占大量土地资源,而且污染土壤、空气和水体,同时还易滋生蚊蝇、传染疾病,更为重要的是严重制约城市经济和社会的可持续发展,因此对城市生活垃圾采取有效的处理是十分必要的. 已有研究表明利

用沼气发酵技术处理不同类型的城市生活垃圾^[2-6],不仅能有效地治理环境污染,又能回收清洁能源,将不失为一种有效的处理处置方法^[7,8].

收稿日期: 2010-06-03; 修订日期: 2010-09-20

基金项目: 昆明理工大学固体废弃物资源化国家工程中心项目
作者简介: 李建昌 (1966 ~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为生物质能与环境工程, E-mail: jclec94213@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: sunkewei@public.km.yn.cn

众所周知,影响城市生活垃圾沼气发酵的因素很多,但从宏观操控方面来看,在给定温度下,对于批量发酵主要操控的是料菌比和发酵含量(连续发酵则还有水力滞留时间、进料量等).料菌比反映的是微生物与其所能承受的原料的比例关系,该比值对沼气发酵能否顺利启动起着至关重要的作用,并对后续的产气效率有着深远的影响^[9~12].而发酵含量通常对产气效率影响较大,在一定的料菌比下,含量较低则产气量不足,含量过高则会出现酸化现象,导致沼气发酵不能正常进行^[13~15].因此为确保城市生活垃圾沼气发酵稳定和高效运行,无论是常温发酵、中温发酵、还是高温发酵,都应有适宜的料菌比和与发酵含量之相对应.然而以往的研究往往只注重单一的因素,忽略了二者的联系,为此,本研究将同时分析料菌比和发酵含量对城市生活垃圾沼气发酵的影响.

诚然,料菌比和发酵含量是影响生活垃圾批量沼气发酵主要的宏观操控参数,但是以往的研究大多使用直接的实验数据对其描述,缺乏较为深入的分析,因此把 Modified Gompertz 模型引入到沼气发酵中,将有利于对实验数据进行深入的分析,并作出合理的预测判断和评价.该模型之所以能够引入到沼气发酵中,是因为 Gompertz 模型为 S 形参数方程,通常用于描述累积变量与时间之间的关系^[16],因此可以用于拟合沼气批量发酵累积产气量与时间之间的关系.然而 Gompertz 模型最初作为人口增长的预测模型,其参数通常不具有生物学意义,直到 1990 年 Zwietering 等^[16]改进了 Gompertz 模型,并赋予了 Modified Gompertz 模型参数特殊的生物学意义后,该模型才得以应用于发酵产氢的研究中^[17],结果表明 Modified Gompertz 模型能较好地反映产氢过程中产气的变化情况. Mu 等^[18]又将 Gompertz 模型方程进行一系列的变型,进一步扩展到预测发酵产氢过程中底物利用、微生物生长、发酵产物情况的应用. Hu 等^[19]曾在香蒲沼气发酵时,利用 Modified

Gompertz 模型来描述底物消耗和产物的形成,得出水解过程是香蒲沼气发酵的限制性阶段.本研究将把 Modified Gompertz 模型应用于考察料菌比和发酵含量对城市生活垃圾沼气发酵的影响.尽管 Modified Gompertz 模型与料菌比和发酵含量之间没有直接的函数和变量关系,但是含量和料菌比的变化必然引起累积产气量的变化,导致 Modified Gompertz 模型参数的改变,因此,反过来可以通过 Modified Gompertz 模型参数的变化特征对料菌比和发酵浓度是否适宜作出合理的评价.

基于以上分析,本研究将采用中温批量发酵的方式,设计单因素实验和多因素均匀设计(Uniform Design)实验,利用 Modified Gompertz 模型拟合城市生活垃圾批量沼气发酵累积产气量与时间的变化,从而获得最大累积产气量、最大产气速率和滞留时间 3 个模型参数,由此推算出 VS 产气率及产气速率等评价指标,进而阐明料菌比和发酵含量同时对城市生活垃圾沼气发酵的影响,为选择适宜的料菌比和发酵含量作出合理的评价.以期为沼气发酵的研究和数据的深入分析提供一种新方法.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 发酵原料

城市生活垃圾来自昆明市某一农贸市场垃圾收集站,通过手工从中选出可分辨的有机垃圾成分,其组成见表 1.分选后的垃圾,采用旋转刀片塑料破膜机进行破碎,然后冰冻储存.再通过恒温干燥烘干,粉碎成粉末状,塑料袋封口储存.测定粉末垃圾的各项成分如表 2.处理后的粉末垃圾作为发酵原料.

表 1 农贸市场垃圾中有机垃圾组成的质量分数/%

水果类	蔬菜类	肉类	秸秆类	厨余类	粪便类
23.21	35.02	5.27	11.18	7.38	17.93

表 2 粉末垃圾的各项组成成分的质量分数/%

TS	VS	矿物质	水溶物	还原糖	淀粉	纤维素	半纤维素	脂肪	粗蛋白
98.28	75.87	12.80	31.77	3.96	18.8	24.27	11.39	7.60	16.00

1.1.2 接种物

接种物取自废弃物资源化国家工程中心城市生活垃圾厌氧消化处理中试基地厌氧反应器中的厌氧活性污泥.经测定,接种时污泥的 TS 为 11.71%,VS

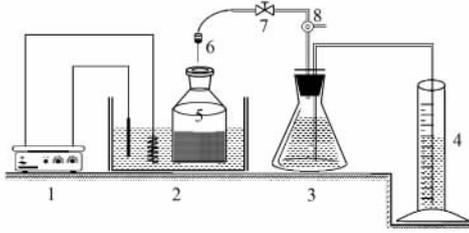
为 7.95%,pH 值为 6.8.

1.2 方法

1.2.1 实验装置

实验装置如图 1.发酵瓶采用 100 mL 血清瓶.

排水集气装置采用1 000 mL的三角瓶和1 000 mL量筒. 投料启动后,发酵瓶用丁基胶盖塞紧,盖上铝盖,用封口钳密封,置于恒温水槽中,每天定时摇动. 产气后,通过针头扎进胶盖,用排水集气法测量每天的产气量. 为避免 CO₂ 被水吸收,集气瓶中使用饱和 NaHCO₃ 溶液.



1. 温控仪; 2. 水槽; 3. 集气瓶; 4. 量筒; 5. 发酵瓶;
6. 针头; 7. 两通活塞; 8. 三通活塞

图1 沼气发酵实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of anaerobic digester

1.2.2 实验设计

实验在恒温 35℃ 下,分别采用单因素实验设计和多因素均匀实验设计.

在单因素实验设计中,料菌比按 VS 计分别为 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1、3.5:1; 发酵浓度按 VS 计分别为 2%、4%、6%、8%、10%、12%. 每个实验 3 个重复,结果取其平均值.

在多因素均匀实验设计中,考察料菌比和发酵浓度 2 个因素,每个因素取 6 个水平,评价指标为累积产气量、产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率. 采用均匀实验设计软件(Uniform Design Version 3.0)设计实验方案.

生活垃圾和接种物的投料量,由式(1)计算:

$$c_{VS} = [W_1 \times VS_1 + W_2 \times VS_2] / W_0 \quad (1)$$

式中, c_{VS} 为发酵混合物的 VS 含量(%); W_0 为发酵混合物的总量(g); W_1 为生活垃圾的投料量(g); W_2 为接种物的投料量; VS_1 为生活垃圾的 VS 含量(%); VS_2 为接种物的 VS 含量(%).

在沼气发酵 VS 含量为 6%,发酵混合物总量为 80 g,和已知粉末生活垃圾的 VS 含量 75.87%、接种物的 VS 含量 7.95% 下,分别改变 VS 料菌比为 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1、3.5:1,根据公式(1)计算出生活垃圾和接种物的投料量,如表 3.

在料菌比为 2.5:1,发酵混合物总量为 80 g,和已知粉末生活垃圾的 VS 含量 75.87%、接种物的 VS 含量 7.95% 下,分别改变发酵 VS 含量为 2%、4%、6%、8%、10%、12%,根据公式(1)计算出

活垃圾和接种物的投料量,如表 4.

表 3 发酵 VS 浓度 6% 下接种物和原料的投料量

料菌比	发酵总量/g	发酵含量/%	垃圾/g	接种物/g	加水/g
1.0:1	80	6	3.16	30.19	46.65
1.5:1	80	6	3.80	24.15	52.05
2.0:1	80	6	4.22	20.13	55.66
2.5:1	80	6	4.52	17.25	58.23
3.0:1	80	6	4.74	15.09	60.16
3.5:1	80	6	4.92	13.42	61.66

表 4 在 VS 料菌比 2.5:1 下接种物和原料的投料量

发酵含量 (VS)/%	发酵总量 /g	料菌比	垃圾 /g	接种物 /g	加水 /g
2	80	2.5:1	1.51	5.75	72.74
4	80	2.5:1	3.01	11.50	65.49
6	80	2.5:1	4.52	17.25	58.23
8	80	2.5:1	6.03	23.00	50.97
10	80	2.5:1	7.53	28.75	43.72
12	80	2.5:1	9.04	34.50	36.46

均匀实验设计中,根据 Uniform Design 设计的实验方案和公式(1)算出生活垃圾和接种物的投料量,如表 5.

表 5 均匀设计实验中接种物和原料的投料量

编号	发酵总量 /g	料菌比	发酵含量 /%	垃圾 /g	接种物 /g	加水 /g
1	80	1.0:1	6	3.16	30.19	46.65
2	80	1.5:1	12	7.59	48.30	24.11
3	80	2.0:1	4	2.81	13.42	63.77
4	80	2.5:1	10	7.53	28.75	43.72
5	80	3.0:1	2	1.58	5.03	73.39
6	80	3.5:1	8	6.56	17.89	55.55

1.2.3 指标数据处理

Gompertz 模型为 S 形三参数方程,如方程(2),其特点是曲线的增长率 > 0,有唯一的拐点和一条水平渐近线,其性态与参数有着的密切关系^[20]. 然而在 Gompertz 模型中,参数 a 、 b 、 c 的值通常不具有生物学的意义,因此在利用 Gompertz 模型拟合时,对方程进行如下改进,使之能适用于沼气发酵动力学参数的拟合.

Gompertz 如方程(2):

$$y(t) = a \cdot \exp[-\exp(b - ct)] \quad (2)$$

其一阶导数和二阶导数如下:

$$\frac{dy}{dt} = ac \cdot \exp[-\exp(b - ct)] \cdot \exp(b - ct) \quad (3)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = ac^2 \cdot \exp[-\exp(b - ct)] \cdot \exp(b - ct) \cdot [\exp(b - ct) - 1] \quad (4)$$

$$\text{令 } \frac{d^2y}{dt^2} = 0, \Rightarrow \text{拐点 } t_i = b/c,$$

此时最大产气速率:

$$R_m = \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t_i} = ac/e,$$

并以 $c = R_m e/a$ 取代 Gompertz 中的参数 c .

令通过拐点的切线方程 $y(t) = R_m \cdot t + a/e - R_m t_i = 0$, 得到滞留时间 $\lambda = (b - 1)/c$, 并以 $b = 1 + \lambda \cdot R_m e/a$ 取代 Gompertz 中的参数 b .

在 Gompertz equation 中, 当 $t \rightarrow \infty, y(t) \rightarrow a$, 即最大累积产气量 $H_m = a$, 并以 $a = H_m$ 取代 Gompertz 中的参数 a .

从而得到 Modified Gompertz 如方程(5), 其形态如图 2.

$$y(t) = H_m \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_m e}{H_m} \cdot (\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (5)$$

在 Modified Gompertz 中, $y(t)$ 表示为时间 t 时的累积产气量(accumulative biogas yield, mL); $H_m = a$ 为最大累积产气量(mL); $R_m = a \cdot c/e$ 为最大产气速率(mL/d); $\lambda = (b - 1)/c$, λ 为滞留时间(d); e 为 $\exp(1) = 2.71828$. 在实际应用中, 首先利用 CurveExpert 1.3 软件中 Gompertz model 对参数 a 、 b 、 c 进行拟合, 然后变换为 H_m 、 R_m 、 λ 的值, 进而计算原料的 VS 产气率和产气速率, 以及产气 100% 和 70% 时的发酵周期.

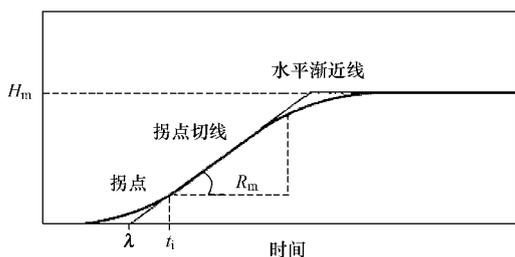


图 2 Modified Gompertz 模型形态

Fig. 2 Curve of Modified Gompertz model

1.2.4 评价指标

本实验的评价指标为: 最大累积产气量(H_m , mL); 最大产气速率(R_m , mL/d); 滞留时间(λ , d); 100% 产气周期($T_{100\%}$, d), 指从启动到产气完全结束所需的时间, 70% 产气周期($T_{70\%}$, d), 指完成最大产气量 70% 所需的时间; 原料的 VS 产气率

(mL/g), 指原料每克 VS 的产气量; 原料的 VS 产气速率[mL/(g·d)]指原料每克 VS 每天的产气量.

1.2.5 分析方法

(1) 总固体含量(TS)和挥发性固体含量(VS)的测定, 采用常规重量分析法测定.

(2) pH 值测定: 启动和结束时, 采用 Orion pH 计(816 type)测定发酵液的 pH 值. 产气过程中, 用微量注射器汲取少量发酵液, 并用精密 pH 试纸测定.

(3) 产气量和产气速率测定: 产气量每天从量筒读出测量, 产气速率根据产气量来计算(mL/d).

(4) 沼气中甲烷含量测定: 用 10 mL 的注射器从发酵瓶上部的气体取样口中准确吸取 10 mL 气体, 用浓 KOH(33%) 吸收完二氧化碳后, 剩余气体代表甲烷的量.

2 结果及分析

2.1 料菌比对生活垃圾沼气发酵的影响

在沼气发酵 VS 含量为 6% 时, 料菌比分别为 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1、3.5:1 下, 考察料菌比对生活垃圾沼气发酵的影响. 在发酵过程中, 所有发酵组的日产气量前期较大, 而后每天的逐渐减小, 且不同实验组间差别较大. 沼气中甲烷含量表现为启动时较低, 而后保持在 50% ~ 70% 之间. pH 值的变化在 6.5 ~ 7.0 之间. 实验结果如图 3 所示.

根据图 3 的实验数据, 联合采用 Gompertz 和 Modified Gompertz 拟合, 结果如表 6.

从表 6 可以看出, 采用 Modified Gompertz 模型对累积产气量随时间变化进行拟合, 其相关系数表明它们之间具有较好的相关性, 据此可以获得相关的参数指标. 最大累积产气量随料菌比的增加而增加, 然而当料菌比高于 2.5:1 后, 反而降低. 最大产气速率除料菌比为 3.5:1 显得较低外, 其余变化不大. 滞留时间除料菌比 1:1 为 0.7 d 外, 其余的通常在 2 ~ 3 d, 表明实验条件下, 沼气发酵的启动时间为 2 ~ 3 d. 发酵周期随料菌比的增加而增加, 100% 发酵周期平均为 103.7 d, 70% 发酵周期平均仅为 24.3 d, 表明在前 25 d 发酵效率较高. VS 的产气率在料菌比 2:1 组最高, 为 539 mL/g, 其次是 2.5:1 组为 528 mL/g, 最低的是 3.5:1 组为 447 mL/g, 并未表现出明显的变化规律, 然而却说明了在料菌比 1:1 ~ 2.5:1 内有较好的 VS 产气率, 料菌比超过 2.5:1 以上时, VS 产气率反而明显降低, 表明高的料菌比对垃圾沼气发酵不利. 但是 VS 产气速率却表现出

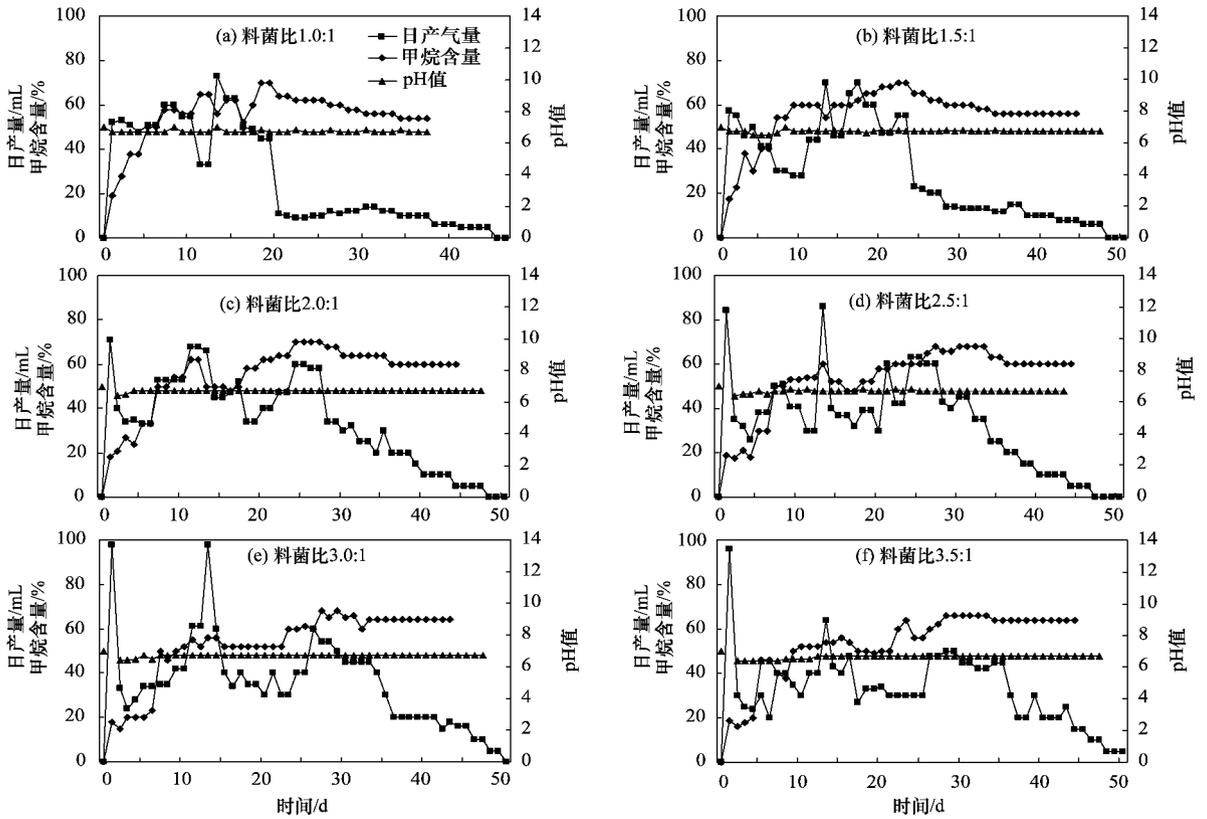


图3 发酵 VS 含量为 6% 时,不同料菌比的日产气量、甲烷含量和 pH 值的变化

Fig. 3 Biogas rate, methane content and pH value per day at a VS concentration of 6%

表 6 发酵 VS 含量 6% 实验组的 Gompertz 动力学参数

Table 6 Kinetic parameters of Gompertz at a VS concentration of 6%

料菌比	模型参数			累积产气量 (H_m) /mL	产气速率 (R_m) /mL·d ⁻¹	滞留时间 (λ)/d	发酵周期		VS 产气率 /mL·g ⁻¹	VS 产气速率 /mL·(g·d) ⁻¹	相关系数 (r)
	a	b	c				($T_{100\%}$)/d	($T_{70\%}$)/d			
1.0:1	1.223	1.088	0.127	1.223	57.0	0.7	73.9	16.7	510	23.7	0.998 3
1.5:1	1.431	1.230	0.106	1.432	55.8	2.2	85.2	21.3	497	19.4	0.998 4
2.0:1	1.723	1.253	0.095	1.724	60.3	2.7	95.6	24.0	539	18.8	0.998 2
2.5:1	1.810	1.270	0.089	1.810	59.5	3.0	110.1	28.0	528	17.3	0.996 0
3.0:1	1.762	1.194	0.079	1.762	51.6	2.4	123.4	26.6	489	14.3	0.997 4
3.5:1	1.669	1.179	0.071	1.669	43.3	2.5	134.2	29.2	447	11.6	0.997 8

明显的变化规律,随料菌比的增加而逐渐降低,实际上反映了在沼气发酵中增加接种量时,VS 产气速率增加,对原料的利用率较大,然而接种量加大,势必导致原料投料减少,处理效率降低,因此选择料菌比为 2:1 ~ 2.5:1 比较适合。

2.2 发酵含量对生活垃圾沼气发酵的影响

在料菌比 2.5:1 下,发酵 VS 浓度分别为 2%、4%、6%、8%、10% 和 12% 下,生活垃圾沼气发酵过程中的日产气量、甲烷含量和 pH 值变化如图 4。就日产气量的多少来说,在产气高峰期,除发酵含量为 12% 实验组外,总体随发酵含量的增加而增加。

而就日产气量的平稳性来说,低发酵含量实验组的日产气量变化相对稳定(如发酵含量为 2%、4% 和 6% 实验组),而高发酵含量实验组的则变化较大(如发酵含量为 8% 和 10% 实验组),而对于发酵含量为 12% 实验组,第 1 d 最大产气量过后,由于 pH 值降得较低(最低 6.2),受酸化的影响产气量一直很低。因此,当以城市生活垃圾为沼气发酵原料时,发酵含量的选择应尽量在增加发酵含量从而提高日产气量的同时,还必须防止高含量发酵容易导致酸化的危险。而对于沼气中甲烷含量,则表现为启动时较低,而后保持在 50% ~ 70% 之间。至于 pH 值的变

化,除发酵 VS 浓度 12% 外,其余通常在 6.5 ~ 7.0 之间.

CurveExpert 1.3 软件对累积产气量、滞留时间和产气速率拟合结果如表 7.

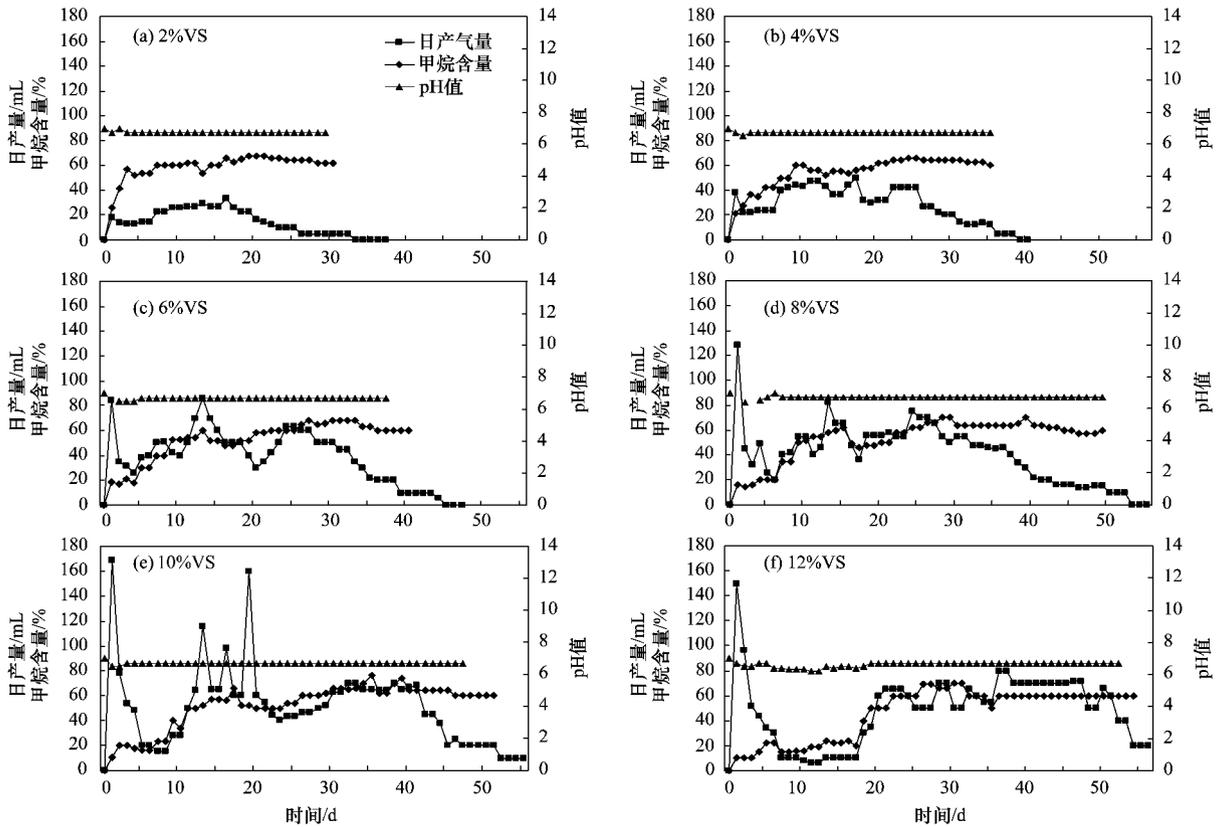


图 4 料菌比为 2.5:1 时,不同发酵含量的日产气量、甲烷含量和 pH 值的变化

Fig. 4 Biogas rate, methane content and pH value per day at a VS ratio of feedstock to inoculum 2.5:1

表 7 VS 料菌比 2.5:1 实验组的 Gompertz 动力学参数

Table 7 Kinetic parameters of Gompertz at a group of 2.5:1 VS ratio of feedstock to inoculum

发酵含量 /%	模拟参数			累积产气量 (H_m) /mL	产气速率 (R_m) /mL·d ⁻¹	滞留时间 (λ)/d	发酵周期		VS 产气率 /mL·g ⁻¹	VS 产气速率 /mL·(g·d) ⁻¹	相关系 数(r)
	a	b	c				($T_{100\%}$)/d	($T_{70\%}$)/d			
2	536	1.569	0.154	536	30.3	3.7	37.9	16.6	501	28.3	0.998 8
4	1 090	1.396	0.113	1 090	45.4	3.5	37.6	19.4	512	21.3	0.998 4
6	1 810	1.238	0.088	1 810	58.6	2.7	49	24	528	17.1	0.996 0
8	2 240	1.314	0.083	2 240	68.2	3.8	64	27.7	525	16.0	0.997 5
10	2 750	1.315	0.075	2 750	75.5	4.2	73	30	516	14.2	0.995 8
12	2 741	1.376	0.048	2 741	48.5	7.8	61	40	428	7.6	0.990 8

表 7 显示,除发酵 VS 含量 12% 组外,累积产气量随时间变化与 Modified Gompertz 模型间具有较好的相关性. 最大累积产气量和最大产气速率,除 12% 组外,随浓度增加而增大,说明当反应器内原料充足时,产气量和产气速率较大,但当含量过高时如 12% 组,反而使最大累积产气量和最大产气速率下降;滞留时间除 12% VS 组 7.8 d 异常外,其余的 3 ~ 4 d 发酵周期随发酵含量的增加而增加,100% 发

酵周期平均为 53.7 d,70% 发酵周期平均仅为 26.3 d,表明在前 26 d 发酵效率较高. 对 VS 的产气率来说,并未表现出明显的变化规律,发酵含量 6% VS 组最高,为 528 mL/g,其次是 8% VS 组为 525 mL/g,最低的 12% 组为 428 mL/g;而对 VS 产气速率来说,变化却比较明显,随含量的增加而逐渐降低. 根据实验结果,发酵 VS 含量在 4% ~ 8% 比较适合.

2.3 料菌比和发酵浓度的组合影响

采用 Uniform Design Version 3.0 软件,通过最大累积产气率,最大产气速率,VS 产气率和 VS 产气速率指标来考察料菌比和发酵含量的双重影响.

表 8 均匀设计实验 Modified Gompertz 拟合的指标值

Table 8 Index value of uniform design experiment from Modified Gompertz

编号	指标 1	指标 2	指标 3	指标 4	相关系数(r)	因素 1	因素 2
1	1 223	28.9	510	12.0	0.998 3	1.0:1	6
2	2 105	59.5	365	10.3	0.998 9	1.5:1	12
3	1 220	47.3	573	22.2	0.998 9	2.0:1	4
4	2 830	66.9	496	11.7	0.997 4	2.5:1	10
5	643	30.2	536	25.1	0.998 7	3.0:1	2
6	2 401	47.0	482	9.4	0.997 3	3.5:1	8

表 9 均匀设计实验回归分析部分结果

Table 9 Partial results of regression analysis in uniform design experiment

项目	显著性水平 α	回归方程			检验值 F_t	临界值 F	回归方程显著性	方程各项对回归的贡献/%		优化结果 (因素 2) /%	
		$y = b(0) + b(1) \cdot X(1) + b(2) \cdot X(2)$	$b(0)$	$b(1)$				$b(2)$	$b(1)/\text{因素 1}$		$b(2)/\text{因素 2}$
指标 1	0.10	$y = -481 + 341X(1) + 208X(2)$	-481	341	208	9.742	5.462	显著 ($F > F_t$)	16.1	95.6	12
指标 2	0.20	$y = 14.1 + 3.95X(1) + 3.39X(2)$	14.1	3.95	3.39	3.071	2.886	显著 ($F > F_t$)	8.42	99.1	12
指标 3	0.20	$y = 595 + 4.05X(1) - 15.7X(2)$	595	4.05	-15.7	3.687	2.886	显著 ($F > F_t$)	0.386	93.2	2
指标 4	0.15	$y = 26.1 + 7.38 \times 10^{-2}X(1) - 1.55X(2)$	26.1	7.38×10^{-2}	-1.55	4.237	3.813	显著 ($F > F_t$)	1.37×10^{-2}	96.4	2

从表 9 可以看出,对于指标 1 最大累积产气量,当显著水平 $\alpha \geq 0.10$ 时,回归方程显著,因素 1 料菌比对回归方程贡献值为 16.1%,因素 2 发酵含量的贡献值为 95.6%;对于指标 2 最大产气率,当显著水平 $\alpha \geq 0.20$ 时,回归方程显著,因素 1 料菌比对回归方程贡献值为 8.42%,因素 2 发酵含量的贡献值为 99.1%;对于指标 3 VS 产气率,当显著水平 $\alpha \geq 0.20$ 时,回归方程显著,因素 1 料菌比对回归方程贡献值为 0.386%,因素 2 发酵含量的贡献值为 93.2%;对于指标 4 VS 产气速率,当显著水平 $\alpha \geq 0.15$ 时,回归方程显著,因素 1 料菌比对回归方程贡献值仅为 $1.37 \times 10^{-2}\%$,因素 2 发酵含量的贡献值为 96.4%。回归分析结果表明发酵含量对最大累积产气量、最大产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率的影响较大,是主要的影响因素,而料菌比的影响则相对较小,尤其是对 VS 产气率和 VS 产气速率几乎不产生影响。当剔除不显著方程项 $b(1)/\text{因素 1}$,再次回归分析并对实验条件进行优化时,发现当以最大累积产气量和最大产气速率为考察指标时,发酵 VS 含量 12% 为最佳条件(实际上酸化的危险比较大);当以 VS 产气率和 VS 产气速率为考察指标时,发酵 VS 含量 2% 为最佳条件。

指标数据根据实验数据、采用 Modified Gompertz 拟合获得,如表 8。根据表 8 的结果,利用 Uniform Design 软件对拟合数据采用全回归法进行回归分析,归纳部分分析结果如表 9。

3 结论

(1) 城市生活垃圾沼气发酵的累积产气量随时间变化与 Modified Gompertz 模型具有较好的相关性,可以根据 Modified Gompertz 模型获得相关的参数指标,以此评价料菌比和发酵含量对沼气发酵的影响,作出合理的选择。

(2) 发酵含量是影响最大累积产气量、最大产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率的主要因素。而料菌比的影响相对较小,特别是对 VS 产气率和 VS 产气速率几乎不产生影响。当发酵含量较低时,VS 产气率较高,当含量较高时,累积产气量较大、产气速率较快。因此若追求原料产气率或者降解率高时,可以适当地降低发酵含量;相反若追求产气量大、产气速度快时,可以适当地增加发酵含量,但是当含量过高时,效果反而不好。因此发酵 VS 含量在 4%~8% 比较适宜。

(3) 尽管料菌比对最大累积产气量、最大产气速率、VS 产气率和 VS 产气速率的影响相对较小,但是料菌比反映的是微生物与原料间的比例关系,当原料过剩时,得不到有效的利用和降解,同时酸化危险比较严重;当微生物过多时,微生物常处于饥

饿状态,效率得不到充分发挥. 因此料菌比在 1.5:1 ~ 2.5:1 比较适宜.

参考文献:

- [1] 李东,孙永明,张宇,等. 城市生活垃圾厌氧消化处理技术的应用研究进展[J]. 生物质化学工程,2008,**42**(4):43-50.
- [2] Mata-Alvarez J, Viturtia A, Llabres-Luengo P, *et al.* Anaerobic digestion of the Barcelona central food market organic wastes: Experimental study [J]. *Bioresource Technology*,1992,**39**(1):39-48.
- [3] Krzystek L, Ledakowicz S, Kahle H J, *et al.* Degradation of household biowaste in reactors [J]. *Journal of Biotechnology*,2001,**92**(2):103-112.
- [4] Rao M S, Singh S P. Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetic studies and gas yield-organic loading relationships for process optimisation [J]. *Bioresource Technology*,2004,**95**(2):173-185.
- [5] Bouallagui H, Touhami Y, Cheikh R B, *et al.* Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes [J]. *Process Biochemistry*,2005,**40**(3-4):989-995.
- [6] Davidsson A, Gruvberger C, Christensen T H, *et al.* Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste [J]. *Waste Management*,2007,**27**(3):406-414
- [7] De Baere L. Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future? [J]. *Water Science and Technology*,2006,**53**(8):187-194.
- [8] Jiang J G, Sui J C, Wu S Y, *et al.* Prospects of anaerobic digestion technology in China [J]. *Tsinghua Science and Technology*,2007,**12**(4):435-440.
- [9] Forster-Carneiro T, Perez M, Romero L I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste [J]. *Bioresource Technology*,2008,**99**(15):6994-7002.
- [10] Raposo F, Banks C J, Sievert I, *et al.* Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests [J]. *Process Biochemistry*,2006,**41**(6):1444-1450.
- [11] Raposo F, Borja R, Martin M A, *et al.* Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*,2009,**149**(3):70-77.
- [12] Liu G Q, Zhang R H, El-Mashad H M, *et al.* Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes [J]. *Bioresource Technology*,2009,**100**(21):5103-5108.
- [13] 刘德江,张富年,邱桃玉,等. 牛粪不同发酵浓度对沼气中甲烷及硫化氢含量的影响[J]. *中国沼气*,2008,**26**(5):18-20.
- [14] Fernandez J, Perez M, Romero L. Kinetics of mesophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of initial total solid concentration [J]. *Bioresource Technology*,2010,**101**(16):6922-6328.
- [15] Li L H, Li D, Sun Y M, *et al.* Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2010,**35**(13):7261-7266.
- [16] Zwietering M H, Jongenburger I, Rombouts F M, *et al.* Modeling of the bacterial growth curve [J]. *Applied and Environmental Microbiology*,1990,**56**(6):1875-1881.
- [17] Lay J J. Modeling and optimization of anaerobic digested sludge converting starch to hydrogen [J]. *Biotechnology and Bioengineering*,2000,**68**(3):269-278.
- [18] Mu Y, Zheng X J, Yu H Q, *et al.* Biological hydrogen production by anaerobic sludge at various temperatures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2006,**31**(6):780-785.
- [19] Hu Z H, Yu H Q. Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures [J]. *Waste Management*,2006,**26**(11):1222-1228.
- [20] 朱珉仁. Gompertz 模型和 Logistic 模型的拟合 [J]. *数学的实践与认识*,2002,**32**(5):705-709.