

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.035

# 餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵工艺优化\*

李轶<sup>1</sup> 李磊<sup>2</sup> 张大雷<sup>3</sup> 谷士艳<sup>1</sup> 寇巍<sup>3</sup> 易维明<sup>4</sup>

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 石家庄弘益节能环保技术有限公司, 石家庄 050081;

3. 辽宁省能源研究所, 营口 115003; 4. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

**【摘要】** 在前期单因素试验的基础上,采用二次回归正交旋转组合设计,以总产气量为响应值,研究餐厨垃圾与牛粪质量比、温度、pH值、接种物与原料质量比4个因素对餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵的影响,建立了产气数学模型,并对模型进行了优化及降维分析。通过上述试验研究,得到最佳工艺条件为:餐厨垃圾与牛粪质量比为2.5,温度37.5℃,pH值7.0,接种物与原料质量比为4;4因素影响主次顺序依次为接种物与原料质量比、温度、餐厨垃圾与牛粪质量比、pH值;通过验证分析,模型预测值与试验值之间误差较小,方差分析不显著,模型拟合较好。

**关键词:** 餐厨垃圾 牛粪 混合厌氧发酵 工艺优化

**中图分类号:** TK6; S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0180-06

## Process Optimization of Anaerobic Fermentation with Mixed Material of Food Garbage and Cow Dung

Li Yi<sup>1</sup> Li Lei<sup>2</sup> Zhang Dalei<sup>3</sup> Gu Shiyan<sup>1</sup> Kou Wei<sup>3</sup> Yi Weiming<sup>4</sup>

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. Shijiazhuang Hongyi Energy Saving and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050081, China

3. Liaoning Institute of Energy Resource, Yingkou 115003, China

4. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

### Abstract

Based on the early single factor test, quadratic regression orthogonal rotating combination design was applied. The whole gas production was taken as response value. Effects of four factors on anaerobic fermentation were studied. These four factors are the ratio of food garbage and cow dung, temperature, pH value and the ratio of inoculum and quality of fermentation. The mathematical mode about mixed fermentation of food garbage and cow dung was established, regression equation was optimized and analyzed, in addition, the optimal condition and interactive effects were exposed. The optimum technological conditions for the mixed-fermentation was as the followings: the ratio of food garbage and cow dung was 2.5, temperature was 37.5℃, the pH value was 7.0 and the ratio of inoculum volume and quality of fermentation was 4. The order of the influence of four factors on mixed-fermentation of food garbage and cow dung was as follows: the ratio of inoculum and quality of fermentation, temperature, the ratio of food garbage and cow dung, and pH value. The gas production of the optimum technological condition and the random experiment also showed no significant difference with the predictive value. The model fitted well.

**Key words** Food garbage, Cow dung, Mixed anaerobic fermentation, Process optimization

收稿日期: 2012-06-30 修回日期: 2012-07-16

\* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2010BAC67B03)

作者简介: 李轶, 副教授, 主要从事新能源及农业生物环境工程研究, E-mail: yilisyau2000@163.com

通讯作者: 易维明, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质能工程研究, E-mail: yiweiming@sdu.edu.cn

## 引言

随着经济的发展和人民生活水平的提高,每年都会产生大量的城市生活垃圾,近10年来其年增长率为6.1%<sup>[1]</sup>,其中厨余垃圾占相当大的比例,如沈阳市仅餐饮业餐厨垃圾日产生总量约为468.886 t,年产生量约为171 143.39 t,占城市生活垃圾的62%<sup>[2]</sup>。厨余垃圾含水量大、有机物含量高、容易生物降解。厨余垃圾传统处理方法有用作饲料、堆肥、填埋等,这些方法存在着一系列问题,如有害微生物多、堆肥质量低及易产生温室气体、渗滤液等<sup>[3-6]</sup>。

厌氧消化技术是处理高浓度有机废水及废物的有效途径之一,用于处理厨余垃圾,不仅能够消除由此带来的环境污染,还可以实现垃圾资源化,达到回收生物气等目的<sup>[7-8]</sup>。但是厨余垃圾单独厌氧消化会导致挥发性脂肪酸(volatile fatty acid,简称VFA)的积累,使pH值降低,最终导致消化效率低,生物产气过程受抑制<sup>[9]</sup>。在厨余垃圾中加入具有一定缓冲能力的有机废水(通常为动物粪便废水或者市政污水)进行混合消化,可以获得很好的消化效果<sup>[10]</sup>。牛粪是一种常见的动物粪便,且常作为厌氧消化的原料之一,但是牛粪含有以纤维素、木质素为主要成分的秸秆、稻草等不易生物降解的物质,其挥发性固体去除率和产气量都很低<sup>[11]</sup>。与厨余垃圾等容易降解的物质进行混合厌氧消化能获得很好的效果<sup>[12-14]</sup>。

本文运用二次回归正交旋转组合设计,以总产气量为响应值,研究餐厨垃圾与牛粪质量比、温度、pH值和接种物与原料质量比4个因素对餐厨和牛粪混合厌氧发酵的影响,以期为餐厨垃圾的资源化利用提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验原料

餐厨垃圾取自辽宁省营口市,将不同时间、地点收集的餐厨垃圾混合后人工分选出无机成分以及塑料、骨头等杂物,将剩余的垃圾粉碎并搅拌成浆液。制得的浆液于4℃生化培养箱中保存,备用。

牛粪取自辽宁省营口市市郊某养牛场;接种污泥取自营口市污水处理厂,接种后自行驯化。

### 1.2 试验原料分析测定方法

利用干燥法测定原料的总固体(TS)和挥发性固体(VS)含量;利用重铬酸钾-外热源法测定总有机碳含量;利用半微量凯氏定氮法测定总氮含量。表1为试验物料特性测试结果。

表1 牛粪、厨余垃圾和接种污泥的主要参数

Tab.1 Main parameters of cow-dung, food garbage and wet inoculum sludge

物料种类	总固体质量分数/%	挥发性固体干基质量分数/%	总碳质量分数/%	总氮质量分数/%	碳氮比
餐厨垃圾	22.36	93.27	46.19	2.69	17.22
牛粪	17.87	86.86	27.28	1.23	21.27
污泥	7.72	73.43			

### 1.3 试验方案

试验在前期单因素试验基础上,取餐厨垃圾与牛粪质量比、温度、pH值、接种物与原料质量比4个因素,采用四因素二次回归正交旋转组合试验设计方法,研究上述因素对餐厨垃圾和牛粪混合原料发酵的影响。每组试验设置3个重复,采用1 000 mL广口瓶,原料总质量100 g,加入接种污泥后,用水补充到1 000 mL,发酵产气30 d。每组试验装置都由一个反应瓶、一个集气瓶和一个排水瓶组成;反应瓶和集气瓶用橡胶管连接,后密封,以保证良好的厌氧环境,反应瓶置于恒温水浴中。

试验因素水平表如表2所示,旋转组合设计方案及试验结果如表3所示,其中 $x_1 \sim x_4$ 表示各因素真实值, $X_1 \sim X_4$ 表示编码值。

表2 试验因素与水平

Tab.2 Factors and levels

水平编码	因素			
	餐厨垃圾与牛粪质量比 $x_1$	温度 $x_2/^\circ\text{C}$	pH值 $x_3$	接种物与原料质量比 $x_4$
-2	1.0	30.0	6.0	1
-1	1.5	32.5	6.5	2
0	2.0	35.0	7.0	3
1	2.5	37.5	7.5	4
2	3.0	40.0	8.0	5

### 1.4 方法

试验因素中温度由不同的水浴温度调节,pH值用4 mol/L  $\text{H}_3\text{PO}_4$ 溶液和4 mol/L  $\text{NaHCO}_3$ 溶液调节。

试验过程中,气体产量采用排水集气法测得,每日上午9:00和下午17:00测定。甲烷含量采用Agilen7820A气相色谱仪进行分析,每3 d测一次。气相色谱条件为:样品定量环0.25 mL;热导检测(thermal conductivity detector,简称TCD)通道流速30 mL/min;TCD温度250℃;TCD通道载气He;阀箱温度120℃;柱箱程序升温45℃(保持6 min)至180℃(保持2.25 min),升温速率20℃/min。试验周期为30 d。

表3 试验方案及试验结果

Tab.3 Plans and results of experiment

试验序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	总产气量 $Y/L$
1	1	1	1	1	14.36 ± 7.01
2	1	1	1	-1	10.33 ± 6.52
3	1	1	-1	1	14.21 ± 6.67
4	1	1	-1	-1	11.42 ± 6.00
5	1	-1	1	1	12.40 ± 5.32
6	1	-1	1	-1	9.15 ± 5.63
7	1	-1	-1	1	9.61 ± 5.54
8	1	-1	-1	-1	8.65 ± 3.91
9	-1	1	1	1	13.10 ± 6.58
10	-1	1	1	-1	8.15 ± 4.43
11	-1	1	-1	1	14.00 ± 6.23
12	-1	1	-1	-1	7.38 ± 4.07
13	-1	-1	1	1	10.33 ± 5.44
14	-1	-1	1	-1	8.99 ± 5.04
15	-1	-1	-1	1	7.92 ± 3.33
16	-1	-1	-1	-1	7.13 ± 4.09
17	2	0	0	0	10.93 ± 4.77
18	-2	0	0	0	11.01 ± 6.12
19	0	2	0	0	10.26 ± 5.80
20	0	-2	0	0	12.14 ± 5.76
21	0	0	2	0	10.30 ± 5.03
22	0	0	-2	0	10.20 ± 4.75
23	0	0	0	2	11.31 ± 3.54
24	0	0	0	-2	8.04 ± 3.89
25	0	0	0	0	11.56 ± 4.98
26	0	0	0	0	11.91 ± 5.33
27	0	0	0	0	10.96 ± 4.65
28	0	0	0	0	11.76 ± 4.03
29	0	0	0	0	10.97 ± 2.89
30	0	0	0	0	11.11 ± 5.57
31	0	0	0	0	10.94 ± 4.33
32	0	0	0	0	10.73 ± 3.76
33	0	0	0	0	11.08 ± 4.22
34	0	0	0	0	10.96 ± 3.97
35	0	0	0	0	11.18 ± 3.69
36	0	0	0	0	11.06 ± 4.06
$K_1$	90.13	92.95	86.81	95.93	
$K_{-1}$	77.00	74.18	80.32	71.20	
$K_2$	10.93	10.26	10.30	11.31	
$K_{-2}$	11.01	12.14	10.20	8.04	
$K_0$	200.32	196.01	197.91	199.06	
$k_1$	11.27	13.11	10.85	11.99	
$k_{-1}$	9.63	9.27	10.04	8.90	
$k_2$	10.93	10.26	10.30	11.31	
$k_{-2}$	11.01	12.14	10.20	8.04	
$k_0$	11.13	10.89	11.00	11.06	
极差 $R$	1.64	3.84	0.96	3.95	

用 SAS 统计分析软件对试验数据进行分析、回归方程推导及响应曲面的生成,从而揭示各因素与产气量之间内在的规律性。

## 2 结果与分析

### 2.1 餐厨垃圾和牛粪混合原料发酵数学模型的建立

以总产气量  $Y$  为目标函数,编码值  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  为自变量,建立数学模型。建立数学模型时所用产气量为表 3 中各试验组总产气量的平均值。利用 SAS 统计分析软件,将试验数据输入计算机,得出编码空间内的回归方程

$$Y = 11.184 + 0.63977X_1 + 1.15029X_2 - 0.34933X_3 + 1.3909X_4 - 0.12928X_1^2 - 0.40935X_2^2 - 0.28215X_3^2 - 0.45315X_4^2 + 0.1156X_1X_2 + 0.34668X_1X_3 + 0.06971X_1X_4 - 0.53253X_2X_3 + 0.88472X_2X_4 + 0.15697X_3X_4 \quad (1)$$

回归方程的方差分析结果见表 4。由表 4 可知,二次回归模型的  $F = 35.05 > F_{0.01}(14, 21)$ ,  $P < 0.0001$ ,表明试验所选用的模型显著。该模型的修正决定系数为 0.9005,表明该模型拟合程度较好。

表4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation

方差来源	自由度	平方和	均方和	$F$	$P$
回归模型	14	397.6588	28.4042	35.05	<0.0001
误差	21	17.0203	0.8105		
总和	35	414.6791			

### 2.2 各因素对餐厨垃圾和牛粪混合发酵的影响

通过比较每个因素的贡献率  $\Delta_j$ ,就可以判定各个因素对响应指标的影响程度。贡献率计算方法如下:

对多项式回归方程各系数进行方差分析,通过  $F$  检验,令

$$\delta = \begin{cases} 0 & (F \leq 1) \\ 1 - \frac{1}{F} & (F > 1) \end{cases} \quad (2)$$

则第  $j$  个因素对指标的贡献率为

$$\Delta_j = \delta_j + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^n \delta_{ij} + \delta_{jj} \quad (3)$$

其中  $\delta_j$ 、 $\delta_{jj}$  分别表示第  $j$  个因素一次项、二次项中的贡献,  $\delta_{ij}$  表示交互项中的贡献,它是由第  $j$  个因素与其他因素交互作用的结果,所以它的贡献应分别加到各个因素中去,一般采取平分的方法<sup>[15]</sup>。

由各回归系数检验的方差比(表 5)及贡献值求出每个因素贡献率为:  $\Delta_{X_1} = 1.6086$ 、 $\Delta_{X_2} = 2.3087$ 、

$\Delta_{x_3} = 1.3059$ 、 $\Delta_{x_4} = 2.6527$ ,由此可见该试验中各因素对响应指标的作用从大到小依次为: $X_4$ 、 $X_2$ 、 $X_1$ 、 $X_3$ ,即对产气量影响大小依次为接种物与原料质量比、温度、餐厨垃圾与牛粪质量比及 pH 值;且 4 个因素都与总产气量呈显著相关性。

表 5 各因素方差分析

Tab. 5 Variance analysis of factors

变异来源	自由度	平方和	均方和	F	P
$X_1$	1	17.418 614 68	4.354 653 67	4.456 4	<0.001
$X_2$	1	38.419 671 81	12.806 553 94	41.83	<0.001
$X_3$	1	22.187 131 10	7.395 710 37	1.425 8	<0.001
$X_4$	1	54.747 527 78	18.249 175 93	59.61	<0.001
$X_1X_2$	1	1.265 062 56	1.265 062 5	4.13	0.069 4
$X_1X_3$	1	0.150 738 06	0.150 738 06	0.49	0.656 4
$X_1X_4$	1	<0.001	<0.001	<0.001	0.620 8
$X_2X_3$	1	4.475 222 71	4.475 222 71	14.62	0.002 0
$X_2X_4$	1	12.721 436 71	12.721 436 71	41.55	<0.001
$X_3X_4$	1	0.482 096 89	0.482 096 89	1.57	2.227 5
$X_1^2$	1	0.095 723 61	0.095 723 61	0.654 1	0.432 3
$X_2^2$	1	0.021 037 11	0.021 037 11	0.716 9	0.636 4
$X_3^2$	1	0.818 517 56	0.818 517 56	5.594 4	0.033 8
$X_4^2$	1	0.512 610 37	0.512 610 37	3.506 3	0.083 3

分析上述结果的原因,主要是因为厌氧发酵产沼气时必须要有足够优良的微生物,以保证沼气发酵罐内的有机物在其作用下转变成沼气,这是制取沼气的重要条件之一,若没加入足够数量含沼气细菌的接种物,往往启动较慢,并且很难产气或产气率不高,且甲烷含量低。但是若菌种过多,则会导致微生物之间产生竞争抑制作用,反而影响其产气效率;而沼气微生物在适宜的温度范围内,随着温度的升高,其生长、繁殖得就越快,产生的沼气就越多;pH 值太高或太低都会破坏菌群之间的平衡,从而影响产气效率。

### 2.3 单因素对餐厨垃圾、牛粪混合厌氧发酵产气效应分析

通过降维分析可将多元问题转换为一元问题,从而分析单因子对响应值的影响,将模型中其他因素控制在相同的水平上,可得到某因素与总产气量的一元回归模型,并作出对应曲线。

图 1 为将其他因素固定在 0 水平时,得到的另一变化因素的一维模型曲线。由图 1 可知,随着餐厨垃圾与牛粪质量比的增加,餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵产气一直呈现上升趋势,但是总产气量变化得较为平缓,说明在试验设置的配比范围内,餐厨垃圾和牛粪混合发酵产气量变化不大。在本试验所

取的温度范围内,随着温度的升高,餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵产气量一直呈现上升的趋势,说明随着温度的升高,微生物生长、繁殖得就越快,产生的沼气就越多。pH 值对总产气量的影响,是随着 pH 值增加先上升后下降,这是因为产酸菌和产甲烷菌对 pH 值的适应范围是不一样的,pH 值太低或太高都会破坏菌群之间的平衡,从而影响产气效率,如图 1 所示,pH 值在  $-1 \sim 0$  水平,即 pH 值在  $6.5 \sim 7.0$  之间变化时,产气量较好。说明在该 pH 值范围内,微生物之间比较容易形成代谢平衡,从而保证厌氧发酵的稳定进行。接种物与原料质量比在  $-2 \sim 1$  水平之间变化时,随着接种物量的增加,总产气量不断增加;但是在  $1 \sim 2$  水平之间时,产气量有略下降的趋势,说明足够数量的菌群数使得产气效率增加,但菌种过多会导致微生物之间产生竞争抑制作用,反而影响其产气效率。

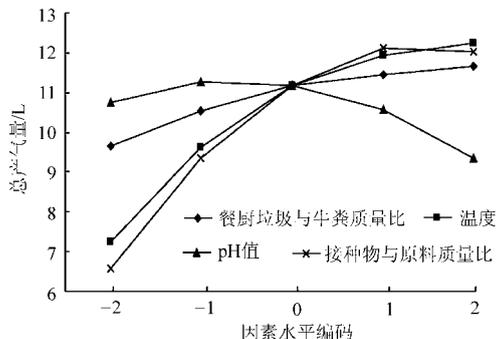


图 1 单因素与总产气量关系

Fig. 1 Relationship between single factor and whole gas production

### 2.4 因素互作效应对餐厨垃圾、牛粪混合发酵产气的影响分析

观察某 2 个因素同时对响应值的影响,可先进行降维分析,即在其他因素条件固定不变的条件下,得出这 2 个因素的二元二次方程,绘制响应曲面图,从而观察这 2 个因素对响应值的影响。

由方差分析表 5 可知,在本试验中  $X_1X_2$  (餐厨垃圾与牛粪质量比、温度)、 $X_2X_3$  (温度、pH 值)、 $X_2X_4$  (温度、接种物与原料质量比)之间的交互作用对总产气量影响显著,而  $X_1X_3$  (餐厨垃圾与原料质量比、pH 值)、 $X_1X_4$  (餐厨垃圾与牛粪质量比、接种物与原料质量比)、 $X_3X_4$  (pH 值、接种物与原料质量比)之间的交互作用对总产气量影响不显著,故只分析餐厨垃圾与牛粪质量比和温度之间、温度和 pH 值之间以及温度和接种物与原料质量比之间的交互作用。其响应曲面图如图 2 所示。

由图 2a 可看出响应曲面坡度较大,说明温度和餐厨垃圾与牛粪质量比两者交互作用较大。在餐厨垃圾与牛粪质量比达到最优之前,总产气量随着温

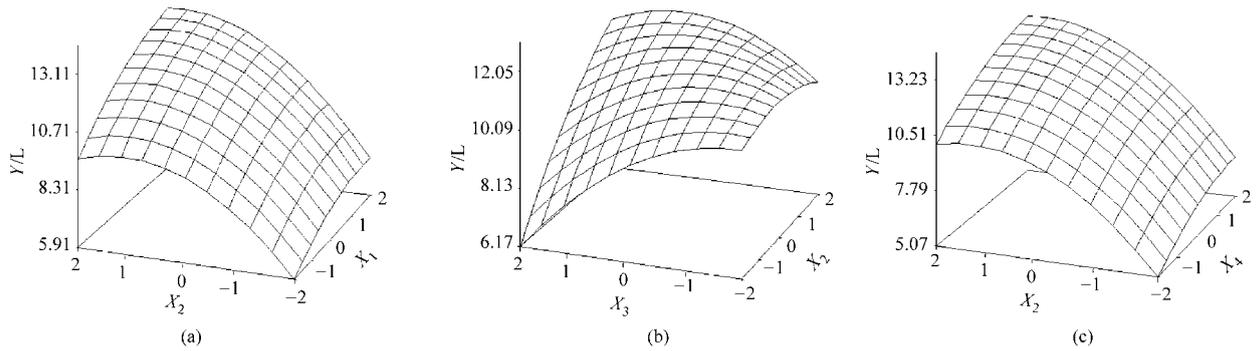


图2 餐厨垃圾与牛粪混合发酵响应面曲线

Fig.2 Response surface curves of anaerobic fermentation mixed with food garbage and cow dung

(a) 餐厨垃圾与牛粪质量比-温度 (b) 温度-pH值 (c) 温度-接种物与原料质量比

度的增加上升较快。在低餐厨垃圾与牛粪质量比、高温条件下,总产气量低;在高餐厨垃圾与牛粪质量比、低温条件下,总产气量也较低;当餐厨垃圾与牛粪质量比在1~2水平,即在餐厨垃圾与牛粪质量比2.5~3.0范围内、温度在1~2水平内,即37.5~40.0℃范围内时,餐厨垃圾、牛粪混合发酵产沼气量较高。

由图2b可看出,响应面坡度较大,说明温度、pH值的交互作用较大。在低温、高pH值条件下,产气量较低;当温度在1~2水平(即温度在37.5~40.0℃范围内)、pH值在-1~0水平(即pH值在6.5~7.0范围内)时,餐厨垃圾、牛粪混合发酵产沼气量较高。

由图2c可知,响应面坡度较大,说明温度和接种物与原料质量比之间交互作用较大。当温度还未达到最优值时,产气量随着接种物与原料质量比的增加而增加。在低温、接种物量较少的条件下,餐厨垃圾、牛粪混合发酵产气量较低。当温度在1~2水平(即温度在37.5~40.0℃范围内)、接种物与原料质量比在1~2水平(即接种物与原料质量比在4~5范围内)时,餐厨垃圾、牛粪混合发酵产沼气量较高。

## 2.5 餐厨垃圾和牛粪混合发酵最佳工艺条件

利用SAS软件进行优化分析,得出产气量达到最高值时的各个因素的水平编码值为:餐厨垃圾与牛粪质量比为1、温度为1、pH值为0、接种物与原料质量比为1。根据编码值与原数值的转换得,餐厨垃圾、牛粪混合厌氧发酵的最佳工艺条件为:餐厨垃圾与牛粪质量比为2.5、温度为37.5℃、pH值为7.0、接种物与原料质量比为4,预测产气量为14.44 L。

## 2.6 模型验证

为验证模型的准确性,选取最佳工艺条件并随机选取了5个不同于表3中的试验组以及得出的最佳产气工艺条件试验组,共6个验证试验组,进行验证试验,最佳产气工艺条件试验组和随机选取的试

验组的水平编码值如表6所示。

在上述条件下分别进行餐厨垃圾和牛粪的混合厌氧发酵试验,测定产气量,对试验值和模型预测值进行误差分析和方差分析,其分析如表7所示。

表6 模型验证试验组水平编码

Tab.6 Levels of experimental factors for model test

试验序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	1	1	0	1
2	1	0	0	0
3	0	1	0	0
4	0	0	1	0
5	0	0	0	1
6	0	0	0	0

表7 产气量模型预测值与试验值方差分析

Tab.7 Variance analysis of predictive value and test value of gas production

组号	试验值	预测值	相对误差	F	F临界值
1	14.51	14.44	0.004 80	0.019 868	
2	11.72	11.69	0.002 85	0.028 846	
3	11.88	11.92	0.003 36	0.576 920	$F_{0.05}(2,3) = 9.55$
4	10.59	10.55	0.003 79	0.008 960	$F_{0.01}(2,3) = 30.82$
5	12.07	12.12	0.004 13	0.004 418	
6	11.11	11.184	0.006 70	0.017 830	

由表7可知,选取的试验组在厌氧发酵后,其产气量的试验值与产气模型预测值之间相对误差均小于0.6%,误差较小,且方差检验结果均为 $F < F_{0.01}$ ,说明模型预测值与实际试验值之间差异不显著,产气量与各因素之间得到的回归模型拟合较好,模型可靠性较高。

## 3 结论

(1)通过四因素二次回归正交旋转组合设计试

验,得出了以餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵总产气量为响应值的数学模型,该模型的修正决定系数为0.9005,模型拟合度较好。餐厨垃圾与牛粪质量比、温度、pH值、接种物与原料质量比4个因素都与产气量呈显著相关性。4个因素对餐厨垃圾与牛粪混合厌氧发酵的影响大小依次为接种物与原料质量比、温度、餐厨垃圾与牛粪质量比、pH值。餐厨垃圾与牛粪质量比和温度之间、温度和pH值之间以及温度和接种物与原料质量比之间的交互作用对产气量影响显著。

## (2) 餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵的最佳工艺

条件为:餐厨垃圾与牛粪质量比为2.5、温度为37.5℃,pH值为7.0,接种物与原料质量比为4。在该条件下餐厨垃圾、牛粪混合厌氧发酵,100g总固体原料在1000mL发酵液中30d得到的总产气量为14.51L。

(3)在试验得出的最佳产气工艺条件下,产气量实际值14.51L与模型预测值14.44L之间相对误差为0.48%,且模型预测值与试验值之间差异不显著。另外,随机选取的试验组模型预测值与试验值之间误差较小,小于0.6%,方差分析不显著,表明模型拟合较好。

## 参 考 文 献

- 吕琛,袁海荣,王奎升,等. 果蔬垃圾与餐厨垃圾混合厌氧消化产气性能[J]. 农业工程学报,2011,27(13):91~95.  
Lü Chen, Yuan Hairong, Wang Kuisheng, et al. Anaerobic digestion performances of fruit and vegetable waste and kitchen waste[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(13): 91~95. (in Chinese)
- 赵蔚蔚,闫永强. 沈阳市餐饮业餐厨垃圾性状及产生量的调查[J]. 环境卫生工程,2007,15(2):10~15.  
Zhao Weiwei, Yan Yongqiang. Investigation of food residue characters and quantity in Shenyang city[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2007, 15(2): 10~15. (in Chinese)
- 姜虎,李文哲,刘建禹,等. 城市餐厨垃圾资源化利用的问题和对策[J]. 环境科学与管理,2010,35(6):27~31.  
Jiang Hu, Li Wenzhe, Liu Jianyu, et al. Urban problems and countermeasures of kitchen waste utilization[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(6): 27~31. (in Chinese)
- 曾彩明,李娴,陈沛全,等. 餐厨垃圾管理和处理方法探析[J]. 环境科学与管理,2010,35(11):31~35.  
Zeng Caiming, Li Xian, Chen Peiquan, et al. Discussion and research on management and disposal of food waste[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(11): 31~35. (in Chinese)
- 张波,蔡伟民,何晶晶. pH调节方法对厨余垃圾两相厌氧消化中水解和酸化过程的影响[J]. 环境科学学报,2006,26(1):45~49.  
Zhang Bo, Cai Weimin, He Pinjing. The influence of pH adjustment methods on hydrolysis and acidogenesis of kitchen wastes in two phase anaerobic digestion[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(1): 45~49. (in Chinese)
- 马磊,王德汉,曾彩明. 餐厨垃圾的干式厌氧消化处理技术初探[J]. 中国沼气,2007,25(1):27~30.  
Ma Lei, Wang Dehan, Zeng Caiming. Dry anaerobic digestion process for treating food waste[J]. China Biogas, 2007, 25(1): 27~30. (in Chinese)
- 王涛,张文阳. 垃圾渗滤液与厨余垃圾混合厌氧消化研究[J]. 环境科技,2011,24(3):23~27.  
Wang Tao, Zhang Wenyang. Anaerobic co-digestion of refuse leachate and kitchen waste[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 24(3): 23~27. (in Chinese)
- 付胜涛,于水利,严晓菊. 剩余活性污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化[J]. 环境科学,2006,27(7):1459~1463.  
Fu Shengtao, Yu Shuili, Yan Xiaojie. Co-digestion of waste activated sludge and kitchen garbage[J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1459~1463. (in Chinese)
- 李荣平,刘研萍,李秀金. 厨余和牛粪混合厌氧发酵产气性能试验研究[J]. 可再生能源,2008,26(2):64~67.  
Li Rongping, Liu Yanping, Li Xiujin. Biogasification performance of anaerobic co-digestion of kitchen residues and cattle manure[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(2): 64~67. (in Chinese)
- 李荣平,李秀金. 半连续式厨余和牛粪混合厌氧消化[J]. 北京化工大学学报,2007,34(增刊2):8~11.
- Han S K, Shin H S, Song Y C, et al. Novel anaerobic process for the recovery of methane and compost from food waste[J]. Water Science and Technology, 2002, 45(10): 313~319.
- Callaghana F J, Wasea D A J, Thayanithya K, et al. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure [J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 27(1): 71~77.
- El-Mashad, Zhang R. Anaerobic codigestion of food waste and dairy manure[C]//Proceedings of the 2006 ASABE Annual International Meeting, Portland Oregon, USA, 2006: 9~12.
- Peter W, Scott I, Ma J, et al. Comparison of five anaerobic digestion systems on dairy farms[C]//2004 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 044032, Ottawa, 2004.
- 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京:中国农业出版社,1998:117~121.