

玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产沼气工艺优化

李 轶¹, 刘雨秋¹, 张 镇¹, 易维明²

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 山东理工大学工程学院, 淄博 250012)

摘要: 该研究针对农村户用沼气发酵中粪便类发酵原料不足、影响沼气池利用率的问题, 为弥补沼气发酵原料单一及不足, 将秸秆、粪便混合作为发酵原料, 对秸秆粪便混合原料厌氧发酵产沼气的工艺条件进行优化研究, 旨在为农村户用沼气工程的健康、稳定运行提供一定的科学依据。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, 以产气量为响应值, 研究玉米秸秆与猪粪质量比、温度、pH 值、接种物质量分数 4 个因素对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵的影响, 得出产气数学模型, 并对数学模型进行了理论分析。通过上述试验研究, 得到最佳工艺条件为: 玉米秸秆与猪粪质量比为 1:1、pH 值为 7.5、接种物质量分数为 50%、温度 30℃, 预测产气量为 18.51 L。4 因素影响主次顺序依次为原料玉米秸秆与猪粪质量比、温度、接种物质量分数、pH 值; 通过验证分析, 模型预测值与试验值之间相对误差小于 5%, 方差分析不显著, 模型拟合较好, 为提高粪便秸秆混合原料发酵产气量和提高发酵效率提供参考。

关键词: 沼气; 秸秆; 发酵; 粪便; 优化

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.024

中图分类号: TK6; S216.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-05-0185-08

李 轶, 刘雨秋, 张 镇, 等. 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产沼气工艺优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 185 - 192.

Li Yi, Liu Yuqiu, Zhang Zhen, et al. Optimization of anaerobic fermentation with mixed materials of corn straw and pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 185 - 192. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

当今, 日渐紧张的能源问题越来越受到人们的关注^[1], 沼气作为生物质新能源为解决农村能源问题开辟了有效途径^[2]。而作为沼气发酵原料的畜禽粪便^[3], 由于家禽饲养量的减少^[4], 发酵原料面临着供应不足的问题^[5], 以单一粪便为发酵原料的沼气厌氧发酵方式受到了不利影响^[6]。

中国作为农作物种植大国^[7], 拥有丰富的农作物资源^[8]。其中最为常见的秸秆类作物每年约有 3.7 亿 t 闲置^[9], 这些可作为能源物质加以利用^[10]。这样, 不仅可以改善农村秸秆堆积的环境状态^[11], 而且可以实现秸秆的合理利用, 解决沼气发酵单一畜禽粪便原料不足的问题^[12]。将畜禽粪便与作物秸秆混合厌氧发酵制沼气^[13], 是解决当前厌氧发酵原料问题的主要手段^[14], 对农村能源产业的发展有着积极的作用^[15]。

但到目前为止, 以猪粪和玉米秸秆混合原料进行厌氧发酵的研究较少, 为弥补理论研究的不足, 本文以玉米秸秆与猪粪混合作为发酵原料^[16], 采用二次回归正交旋转组合设计^[17], 以产气量为响应值^[18], 研究玉米秸秆与猪粪质量比、温度、pH 值和接种物质量分数 4 个因素对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵的影响^[19], 以期通过本研究, 为混合原料厌氧发酵制沼气提供科学依据^[20]。

1 材料与方 法

1.1 试验原料

1) 猪粪

猪粪取自辽宁省沈阳市市郊某养猪场鲜粪。

2) 玉米秸秆

玉米秸秆取自辽宁省沈阳市市郊某玉米地, 将玉米秸秆置于实验室阳光间进行晾晒, 除去水分后备用。

3) 接种物

接种物取自辽宁省沈阳市市郊某养猪场新鲜猪粪, 新鲜猪粪取回后在室温下自行驯化。经过 2 个月的堆沤, 达到腐熟状态。试验原料的成分含量见表 1。

1.2 试验方案

本试验前期为了确定不同因素对玉米秸秆与

收稿日期: 2013-07-23 修订日期: 2014-01-06

基金项目: 国家科技支撑项目(2010BAC67B03)

作者简介: 李 轶(1967-), 女, 辽宁阜新新人, 沈阳农业大学副教授, 博士, 主要从事新能源及农业生物环境工程方面的研究。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110866。Email: yilisyau2000@163.com

通信作者: 易维明(1963-), 男, 河北涿州人, 山东理工大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事生物质能工程方面的研究。淄博 山东理工大学工程学院, 250012。Email: yiweiming@sdu.edu.cn

猪粪混合厌氧发酵的影响,对发酵过程中的玉米秸秆与猪粪质量比(干重)、温度、pH值、接种物质

表1 试验原料的成分含量

原料 Materials	总固体质量分数 Total solid/%
玉米秸秆 Corn straw	73.41
猪粪 Pig Manure	31.17
接种物 Inoculum	22.99

注:接种物为堆沤腐熟猪粪。

Note: Inoculum indicates the fermented pig manure

量分数(接种物质量与原料质量百分比)4个因素进行单因素试验,测定发酵过程中pH值、产气量和甲烷含量的变化。在此基础上,取玉米秸秆与猪粪质量比(干质量)、温度、pH值、接种物质量分数作为试验因素,以沼气产量为试验指标,采用二次正交旋转组合实验设计的方法^[21],确定秸秆和粪便混合发酵较佳的工艺条件^[22]。中国农村用户沼气池属于常温发酵,本研究在北方一年中取每个季节的平均温度,在此温度条件范围内,取沼气可以正常发酵的温度区间,以期研究结果符合实际应用的条件^[23]。因此,本研究在20~28温度范围内取值。根据沼气发酵一般工艺条件的理论,pH值在6.5~7.5之间;为了探讨秸秆-粪便混合原料发酵对接种物的匹配,将接种物量在基本量上下进行了浮动,因此在发酵过程中接种物质量分数控制在10~50%之间;玉米秸秆与猪粪质量比参考其他研究试验值设定。

每组试验设置3个重复,采用1000 mL广口瓶,发酵产气时间为45 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;反应瓶和集气瓶用胶皮管连接后密封,以保证良好的厌氧环境,反应瓶置于恒温水浴锅中。用稀磷酸调节混合物的pH值。试验因素与水平表见表2。

表2 试验因素与水平

Table 2 Experimental factors and levels

因素 Factor	水平 编码 Level code	玉米秸秆与猪 粪质量比 X_1 Corn straw/pig manure ratio	pH值 X_2 pH value X_2	接种物质量 分数 X_3 Inoculum percentage/%	温度 X_4 Temperature /
上星号臂	+1.682	3:1	7.5	50	30
上水平	+1	2.6:1	7.3	42	28
零水平	0	2:1	7	30	25
下水平	-1	1.4:1	6.7	18	22
下星号臂	-1.682	1:1	6.5	10	20

1.3 试验方案设计

根据表2试验因素与水平表,利用DPS数据处理软件进行二次正交旋转组合试验方案设计。

通过二次正交旋转组合试验,在不考虑沼气的纯度情况下,以沼气产量为响应值^[24],建立多元回归方程,对多元回归方程进行检验;分析单因素效应对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵沼气产量的影响,并分析各单因素对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵沼气产量的重要程度^[25],分析不同因素间的交互作用对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵沼气产量的影响,并通过DPS数据处理软件求出最优工艺条件^[26]。

2 结果与分析

2.1 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产气数学模型的建立

采用四因素五水平二次正交旋转组合试验设计方案对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵条件进行了优化。其结构矩阵及试验结果见表3。

表3 二次正交旋转组合设计试验结果表

Table 3 Matix of parameters in orthogonal rotation regression analysis

编号 Number	玉米秸秆与 猪粪质量比 x_1 Corn straw /pig manure ratio	pH值 pH value x_2	接种物质量 分数 x_3 Inoculum percentage	温度 x_4 Temperature	产气量 Y Biogas production/L
1	1	1	1	1	4.837
2	1	1	-1	-1	4.070
3	1	-1	1	-1	7.277
4	1	-1	-1	1	5.248
5	-1	1	1	-1	12.509
6	-1	1	-1	1	7.227
7	-1	-1	1	1	4.617
8	-1	-1	-1	-1	7.704
9	-1.682	0	0	0	5.970
10	1.682	0	0	0	5.749
11	0	-1.682	0	0	5.056
12	0	1.682	0	0	5.992
13	0	0	-1.682	0	5.361
14	0	0	1.682	0	7.422
15	0	0	0	-1.682	5.806
16	0	0	0	1.682	6.468
17	0	0	0	0	3.883
18	0	0	0	0	4.002
19	0	0	0	0	4.318
20	0	0	0	0	4.642
21	0	0	0	0	4.518
22	0	0	0	0	4.269
23	0	0	0	0	4.377

根据表3的试验结果,用DPS数据分析软件进行统计分析,得到玉米秸秆与猪粪质量比、温度、

pH 值、接种物质量分数与沼气产量之间的量化关系在编码空间内的多元回归模型如下：

$$Y = 4.338198 - 0.853174X_1 + 0.413626X_2 + 0.594329X_3 - 0.698181X_4 + 0.500836X_1^2 + 0.417397X_2^2 + 0.721984X_3^2 + 0.699887X_4^2 - 1.386250X_1X_2 - 0.006750X_1X_3 + 0.881250X_1X_4 \quad (1)$$

式中： Y 为产气量，L； X_1 为玉米秸秆与猪粪质量比； X_2 为 pH 值； X_3 为接种物质量分数，%； X_4 为温度，

2.2 检验回归方程

使用数据处理软件对试验结果进行分析处理后得出方差分析结果，采用 F 检验法对所得回归方程进行回归系数的显著性检验^[27]、回归方程的显著性检验和失拟检验。结果见表 4。

表 4 回归方程的方差分析
Table 4 Variance analysis of regression equation

变异来源 Source of variation	平方和 Quadratic sum	自由度 Free degree	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
X_1	6.4398	1	6.4398	5.7387	0.0355
X_2	1.5363	1	1.5363	1.3691	0.2667
X_3	3.8089	1	3.8089	3.3942	0.0925
X_4	3.8635	1	3.8635	3.4429	0.0905
X_1^2	3.5924	1	3.5924	3.2013	0.1011
X_2^2	2.2265	1	2.2265	1.9841	0.1866
X_3^2	6.4249	1	6.4249	5.7254	0.0357
X_4^2	4.9678	1	4.9678	4.4270	0.0592
X_1X_2	12.0417	1	12.0417	10.5345	0.0085
X_1X_3	0.0028	1	0.0028	0.0003	1.0608
X_1X_4	4.9477	1	4.9477	4.2573	0.0691
回归	72.9411	11	6.6310	$F_2=5.66605$	0.0038
剩余	12.8734	11	1.1703		
失拟	12.2333	5	2.2447	$F_1=5.44445$	1.0003
误差	2.4737	6	0.4123		
总和	85.8145	22			

对各项回归系数进行显著性检验，计算其相关系数 (R): $R = \text{回归平方和} / \text{总平方和} = 0.84999$, $R > R_{0.01}(5, 11) = 0.821$, 则 $P < 0.01$, 表明该回归方程拟合效果良好。经过查表可知 $F_1 = 5.44445 < F_{0.01}(5, 6) = 8.75$, $F_2 = 5.66605 > F_{0.01}(11, 11) = 4.46$, 即失拟方差显著, 回归方差显著, 说明本二次回归方程本身是高度显著的。试验数据与采用的二次数学模型是吻合的, 不需要改变回归模型。

由表 4 中各项系数的显著性检测结果, 剔除不显著项后的简化方程为:

$$Y = 4.338198 - 0.853174X_1 + 0.594329X_3 - 0.698181X_4 + 0.721984X_3^2 + 0.699887X_4^2 - 1.386250X_1X_2 + 0.881250X_1X_4 \quad (2)$$

2.3 不同因素对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵的影响

由原始回归方程可知, 一次项中的 X_1 和 X_4 的系数小于 0, X_2 和 X_3 的系数大于 0, 所有二次项的系数均大于 0。一次项系数的绝对值的大小表明了该因素对沼气产量影响的强弱。根据得到的模型进行主效应分析可得, 各因素对厌氧发酵沼气产量的影响程度分别为 $X_1 > X_4 > X_3 > X_2$ (即玉米秸秆与猪粪质量比 > 温度 > 接种物质量分数 > pH 值)。从交互项系数可以看出交互效应情况是 $X_1X_2 > X_1X_4 > X_1X_3$ 。

利用降维分析, 得出单因素对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵沼气产量的影响, 即将其他因素均控制在零水平, 可得到另 1 个因素与沼气产量的一元回归模型, 并作出相应曲线, 结果如图 1 所示。

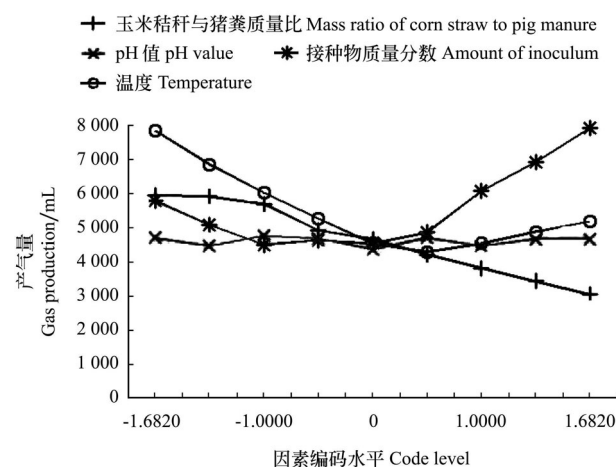


图 1 单因素与沼气产量关系图

Fig.1 Relationship between single factor and biogas production

由图 1 可知, 随着玉米秸秆与猪粪质量比的增加, 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵沼气产量一直呈现缓慢下降的趋势, 说明在试验设置的配比范围内, 玉米秸秆与猪粪混合发酵产气量变化趋势缓慢。温度对于沼气产量的影响, 随着温度的升高, 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵沼气产量呈现出先下降后缓慢上升的趋势, 说明随着温度的升高, 产生的沼气开始受到抑制而后产生上升的趋势。在试验所取 pH 值范围内, 随着水平值增加, 沼气产量的变化趋势不明显, 分析原因可能由于试验所取 pH 值差异不明显^[28]。对沼气产量幅度影响最大表现为接种物质量分数, 随着接种物质量分数的增加, 沼气产量呈现出先缓慢降低后升高的趋势, 说明菌种对于沼气产量的增加开始作用不明显, 当菌种量增加到一定程度后对沼气产量有明显的促进作用^[29]。

2.4 因素交互效应对玉米秸秆与猪粪混合发酵沼气产量的影响

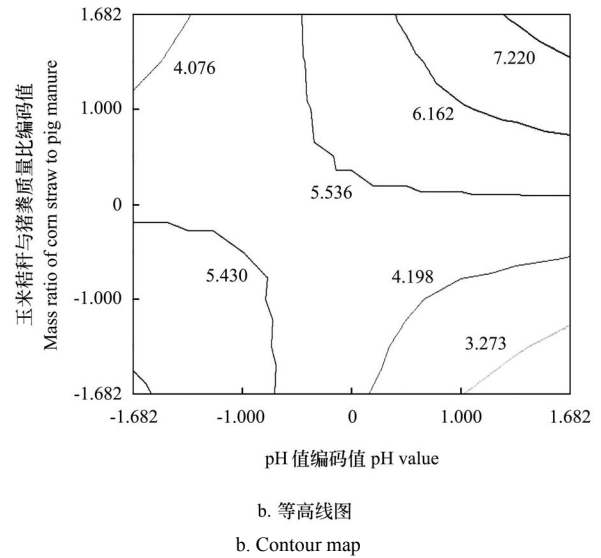
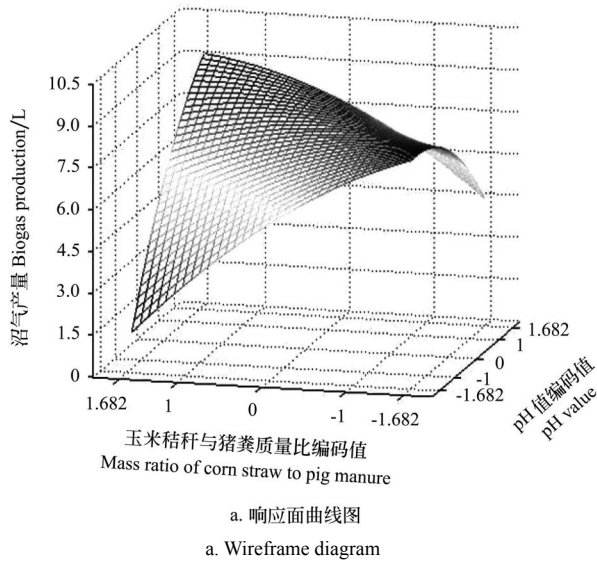
对各因素之间交互作用, 常以响应面法进行分析, 本试验采用 DPS 数据处理系统对 4 个因素两两

之间的交互作用进行分析处理，得到因素之间相互作用的等高线图和响应面图。

由响应面坡度的陡缓程度，来确定响应值对因素交互作用的敏感程度。即坡度越陡，交互作用越敏感，曲面越缓，因素间交互作用的影响就越小。同时，等高线图可以求得相互作用中的最大响应值。

由方差分析表 4 可知，在本试验中 X_1X_2 (原料配比和 pH 值)、 X_1X_4 (玉米秸秆与猪粪质量比和温

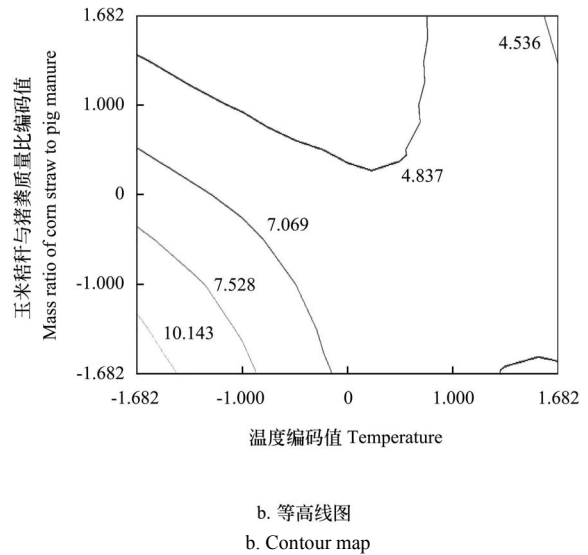
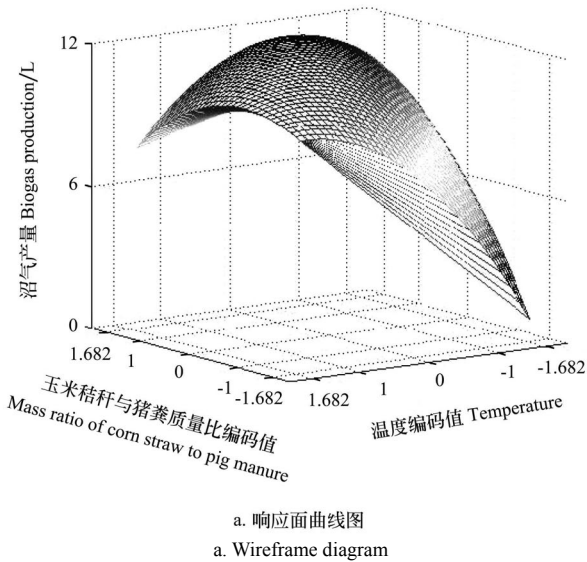
度) 之间的交互作用对产气量影响显著，而 X_1X_3 (玉米秸秆与猪粪质量比和接种物质量分数)、 X_2X_3 (pH 值和接种物质量分数)、 X_2X_4 (pH 值和温度)、 X_3X_4 (接种物质量分数和温度) 之间的交互作用对产气量影响不显著，因此在其他因素控制在零水平上时，只对玉米秸秆与猪粪质量比和 pH 值、玉米秸秆与猪粪质量比和温度的交互作用进行分析，其响应曲面图和等高线图如图 2、图 3 所示。



注：其他因素控制在零水平上。
Note: Other factors are controlled at zero level.

图 2 玉米秸秆与猪粪原料质量比—pH 值响应面曲线图及等高线图

Fig.2 Response surface plot and contour plot of mass ratio of corn straw/pig manure ratio and pH value



注：其他因素控制在零水平上。
Note: Other factors are controlled at zero level.

图 3 玉米秸秆与猪粪原料质量比—温度响应面曲线图等高线图

Fig.3 Response surface plot and contour plot of mass ratio of corn straw/pig manure and temperature

由图 2a 可看出响应曲面坡度较大，说明玉米秸秆与猪粪质量比与 pH 值交互作用较大。在玉米

秸秆与猪粪质量比达到最优值之前，沼气产量随着 pH 值的增加先上升后下降。从图 2b 等高线图可看

出,在高玉米秸秆与猪粪质量比、高 pH 值条件下,沼气产量较高。当玉米秸秆与猪粪质量比在 1 ~ 1.682 水平,即在猪粪和玉米秸秆原料配比 2.6 : 1 ~ 3 : 1 范围内, pH 值在 1 ~ 1.682 水平内,即 pH 值为 7.3 ~ 7.5 范围内时,玉米秸秆与猪粪混合发酵产沼气的量较高。

由图 3a 可看出,响应面坡度较大,说明玉米秸秆与猪粪质量比、温度的交互作用较大。在玉米秸秆与猪粪质量比达到较优值时,沼气产量随着温度的增加先升高后下降。从图 3b 等高线图可看出,在高玉米秸秆与猪粪质量比、高温条件下,沼气产量较低。当玉米秸秆与猪粪质量比在 1 : 1 ~ 1.4 : 1 范围内、温度在 1.682 ~ -1 水平,即温度在 20 ~ 22 范围内时,玉米秸秆与猪粪混合发酵沼气产量较高。

2.5 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵沼气产量最佳工艺条件

利用 DPS 数据分析软件,进行优化分析,得出沼气产量达到最高值时的各个因素的水平编码值为 X_1 为 -1.682、 X_2 为 1.682、 X_3 为 1.682、 X_4 为 1.682,根据编码值与原数值的转换得,玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵的最佳工艺条件为:玉米秸秆与猪粪质量比为 1 : 1、pH 值为 7.5、接种物质量分数为 50%、温度为 30 ℃,预测产气量为 18.51 L。与表 3 相比,预测产气量值较高,原因是各个因素水平的不同对产气量的影响很大,在最佳的因素水平组合即最佳的工艺条件下,可以得到较佳的产气量。

2.6 沼气产量模型验证分析

通过验证试验得到试验值,同时通过数学模型计算出预测值。对试验值与预测值进行方差分析来验证数学模型,如表 5 和表 6 所示。

表 5 模型验证试验组水平编码表

Table 5 Levels of experimental factors for the model test

序号 Number	玉米秸秆和猪粪 质量比 x_1 Corn straw/pig manure ratio	温度 x_2 Temperature	pH 值 x_3 pH value	接种物质量 分数 x_4 Inoculum percentage
1	1.682	1	0	0
2	0	0	1.682	1
3	0	1	0	1.682

表 6 沼气产量模型预测值与试验值方差分析表

Table 6 Variance analysis of predicted value and observed value of biogas production

试验组号 Test group	试验值 observed Value/L	预测值 Predicted Value/L	相对误差 Fractional error	F 值 F value	F 值临界值 Critical value of F value
1	2.71	2.82	0.03901	30.25	
2	7.51	7.38	0.01762	42.25	$F_{0.01(1,2)}=98.49$
3	5.85	5.97	0.02010	9	

在上述条件下进行玉米秸秆与猪粪的混合厌氧发酵沼气产量验证试验,对试验值和模型预测值进行误差分析和方差分析,结果如表 5、表 6 所示。验证试验组沼气产量与模型预测值直接相对误差小于 5%,且 F 值均小于 $F_{0.01}$,说明模型预测值与试验值没有显著性差异,即沼气产量回归模型拟合较好,得到的沼气产量回归模型可靠性较高^[30]。

3 结 论

1) 本试验通过 4 因素二次回归正交旋转组合设计试验,得出了以玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产气量为响应值的数学模型,对各项回归系数进行显著性检验,其相关系数 R 为 0.84999 > $R_{0.01}(5,11)$ = 0.821,表明该回归方程拟合效果良好。玉米秸秆与猪粪质量比、温度、pH 值、接种物质量分数 4 个因素都与产气量呈显著相关性,说明本试验二次回归方程本身是高度显著的。4 因素对玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵产气的影响大小依次为玉米秸秆与猪粪质量比、温度、接种物质量分数、pH 值。玉米秸秆与猪粪原料配比和 pH 值、玉米秸秆与猪粪质量比和温度之间的交互作用对产气量影响显著,而玉米秸秆与猪粪质量比和接种物质量分数、pH 值和接种物质量分数、pH 值和温度、接种物质量分数和温度之间的交互作用对产气量影响不显著。

2) 玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵的最佳沼气产量工艺条件为:玉米秸秆与猪粪质量比为 1 : 1、pH 值为 7.5、接种物质量分数为 50%、温度为 30 ℃,预测产气量为 18.51 L。

3) 在试验得出的最佳沼气产量工艺条件下,通过玉米秸秆与猪粪厌氧发酵验证试验,分析结果显示沼气累积量的试验值与模型预测值之间的相对误差小于 5%,且 F 值均小于 $F_{0.01}$,表明沼气产量回归模型的可靠性较高。

[参 考 文 献]

- [1] 倩云超,邝哲师,潘木水,等. 我国农村户用型沼气的发展历程及现状分析[J]. 广东农业科学,2006(11): 22 - 27.
Qian Yunchao, Qi Zheshi, Pan Mushui, et al. Development progress and current situation analysis of the rural household biogas in China[J]. Guangdong Agricultural Science, 2006(11): 22 - 27. (in Chinese with English abstract)
- [2] 白洁瑞,李轶冰. 不同温度条件粪秆结构配比及尿素、纤维素酶对沼气产量的影响[J]. 农业工程学报,2009, 25(2): 188 - 193.
Bai Jierui, Li Yibing. Effects of ratios of manure and

- straw, urea and cellulose on biogas yields at different temperatures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(2): 188 - 193. (in Chinese with English abstract)
- [3] 董保成,赵凯,贾照良. 我国沼气工程标准化发展现状[J]. 农业工程技术, 2010(11): 1 - 3.
Dong Baocheng, Zhao Kai, Jia Zhaoliang. Status of biogas engineering standards development in China[J]. Agricultural Engineering Technology, 2010(11): 1 - 3. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李轶冰,杨改河,楚莉莉,等. 中国农村户用沼气主要发酵原料资源量的估算[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 231 - 237.
Li Yibing, Yang Gaihe, Chu Lili, et al. Estimation of resource extent of dominant feedstock for household biogas in rural areas of China[J]. Resources Science, 2009, 31(2): 231 - 237. (in Chinese with English abstract)
- [5] 向远平. 大中型沼气工程在新能源产业中的现状与对策[J]. 新能源产业, 2010(4): 1 - 3.
Xiang Yuanping. Present situation and countermeasures in the new energy industry in large and medium-sized biogas project[J]. New Energy Industry, 2010(4): 1 - 3. (in Chinese with English abstract)
- [6] 岑承志,陈砺,严宗诚. 沼气发酵技术发展及应用现状[J]. 广东化工, 2009, 36(6): 78 - 79.
Cen Chengzhi, Chen Li, Yan Zongcheng. Technical progress and application status of biogas fermentation technology[J]. Guangdong Chemical, 2009, 36(6): 78 - 79. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨立,张婷,王永泽,等. 不同秸秆厌氧发酵产沼气效果的比较[J]. 可再生能源, 2008, 26(5): 46 - 52.
Yang Li, Zhang Ting, Wang Yongze, et al. Comparison on the biogas production effect of different stalks anaerobic fermentation[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(5): 46 - 52. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈洪章,李佐虎. 秸秆综合利用技术与生态工业[J]. 精细与专用化学品, 2000(10): 8 - 11.
Chen Hongzhang, Li Zuohu. Comprehensive utilization technology of straw and ecological industry[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2000(10): 8 - 11. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈广银,郑正,邹星星,等. 稻草与猪粪混合厌氧消化特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 185 - 188.
Chen Guangyin, Zheng Zheng, Zou Xingxing, et al. Anaerobic co-digestion of rice straw and pig manure feature[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 185 - 188. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈小华,朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 279 - 283.
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 279 - 283. (in Chinese with English abstract)
- [11] 宁桂兴,申欢,文一波,等. 秸秆厌氧消化试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1279 - 1283.
Ning Guixing, Shen Huan, Wen Yibo, et al. Study on anaerobic digestion of straw stalk[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1279 - 1283. (in Chinese with English abstract)
- [12] 南艳艳,邹华,严群,等. 秸秆厌氧发酵产沼气的初步研究[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 27(6): 64 - 68.
Nan Yanyan, Zou Hua, Yan Qun, et al. Elemental study on the biogas anaerobic fermentation with crop straw[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2007, 27(6): 64 - 68. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陶朴良,张无敌,宋洪川,等. 沼气发酵综合利用的现状与发展趋势[J]. 新能源及工艺, 2001(5): 9 - 11.
Tao Puliang, Zhang Wudi, Song Hongchuan, et al. Status and development tendency of comprehensive utilization of biogas and fermentative residues[J]. Energy Engineering, 2001(5): 9 - 11. (in Chinese with English abstract)
- [14] 夏新兴,黄海. 厌氧生物处理技术的影响因素、种类与发展[J]. 黑龙江造纸, 2006(4): 20 - 22.
- [15] 潘亚杰,张雷,郭军,等. 农作物秸秆生物法降解的研究[J]. 可再生能源, 2005(3): 33 - 35.
Pan Yajie, Zhang Lei, Guo Jun, et al. The study on biologic degradation of crops straw[J]. Renewable Energy Resources, 2005(3): 33 - 35. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曾祥平,郭曦,邓佳,等. 猪粪无害化处理及资源化利用研究[J]. 四川农机, 2010(1): 30 - 34.
Zeng Xiangping, Guo Xi, Deng Jia, et al. Study of pig manure harmless treatment and resource utilization[J]. Agricultural Machinery of Sichuan, 2010(1): 30 - 34. (in Chinese with English abstract)
- [17] 董瑞,唐明磊,吴玉霞,等. 二次回归正交旋转组合设计优化伊宁红皮蒜鳞茎盘组织培养研究[J]. 新疆农业科学, 2012(4): 646 - 652.
Dong Rui, Tang Minglei, Wu Yuxia, et al. Optimization of tissue culture in xinjiang red garlic by using quadratic regression orthogonal rotation combination design[J].

- Xinjiang Agricultural Sciences, 2012(4): 646 - 652. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王丽丽, 王忠江, 梁俊爽, 等. 20~30 牛粪厌氧发酵产气特性的试验[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(6): 791 - 795.
Wang Lili, Wang Zhongjiang, Liang Junshuang, et al. Study on anaerobic fermentation of dairy cattle manure at 20~30 [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006, 37(6): 791 - 795. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘荣厚. 温度条件对猪粪厌氧发酵沼气产气特性的影响[J]. 可再生能源, 2006(5): 32—35.
Liu Ronghou. Effect of temperature on biogas yield and property during anaerobic fermentation process of pig du[J]. Renewable Energy Resources, 2006(5): 32 - 35. (in Chinese with English abstract)
- [20] 秦学功, 徐馨. 二次回归正交旋转组合设计优化苦参生物碱渗漉提取条件[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(22): 2712.
Qin Xuegong, Xu Xin. Two regression orthogonal rotational combination design optimization of Sophora flavescens alkaloids percolation extraction conditions[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2008, 33(22): 2712. (in Chinese with English abstract)
- [21] 任丹, 辜运富, 张小平, 等. 二次回归正交旋转组合设计在紫芝液体发酵培养条件优化中的应用[J]. 西南农业学报, 2011(2): 681 - 686.
Ren Dan, Gu Yunfu, Zhang Xiaoping, et al. Optimization of liquid fermentation conditions of ganodermasinensis through quadratic orthogonal rotation combination design[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011(2): 681 - 686. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王晓娇, 李轶冰, 杨改河, 等. 牛粪、鸡粪和稻秆混合的沼气发酵特性与工艺优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 104 - 108.
Wang Xiaojiao, Li Yibing, Yang Gaihe, et al. Fermentation and process optimization of mixed cow dung, chicken manure and rice straw for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 104 - 108. (in Chinese with English abstract)
- [23] 姚立影, 李涛. 发展沼工程的重要性及其装置存在的问题[J]. 新技术新工艺, 2011(3): 71 - 74.
Yao Liying, Li Tao. The importance of the development in the methane project and the problems of the existing installation[J]. The New Technology and New Process, 2011(3): 71 - 74. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐效圣, 傅力, 邓启华. 采用二次回归正交旋转组合设计对核桃渣磨浆工艺的条件优化[J]. 食品工业科技, 2010(1): 213 - 215.
Xu Xiaosheng, Fu Li, Deng Qihua. Optimization of the two orthogonal revolving combination design pulping conditions of walnut pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010(1): 213 - 215. (in Chinese with English abstract)
- [25] Jeewon L. Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol[J]. Journal of Biotechnology, 1997(6): 323 - 325.
- [26] 邢东旭, 廖森泰, 刘吉平. 应用二次回归正交旋转组合设计[J]. 食品工业科技, 2007(6): 145.
Xing Dongxu, Liao Sentai, Liu Jiping. Application of two quadratic regression orthogonal rotational combination design[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007(6): 145. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张翠丽, 李轶冰. 牲畜粪便与麦秆混合厌氧发酵的产气量、发酵时间及最优温度[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1817 - 1822.
Zhang Cuili, Li Yibing. Biogas yield and its relations with the duration and temperature of mixed anaerobic fermentation of livestock manure and wheat straw mixed[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(8): 1817 - 1822. (in Chinese with English abstract)
- [28] Ayhan Demirbas, Erol Pehlivan, Turkan Altun. Potential evolution of Turkish agricultural residues as bio-gas, bio-char and bio-oil sources. Department of Chemical Engineering[J]. Selcuk University, 42031 Konya, Turkey, 2005(9): 69 - 73.
- [29] Bisaria, Ragini, Mira Madan, Mukhopadhyay. Production of biogas from residues from mushroom cultivation[J]. Biotechnology Letters, 1983, 5(12): 811 - 812.
- [30] Borja R, Martin A, Sanchez E, et al. Kinetic modeling of the hydrolysis, acidogenic and methanogenic steps in the anaerobic digestion of two-phase olive pomace[J]. Process Biochem, 2005(4): 1841 - 1847.

Optimization of anaerobic fermentation with mixed materials of corn straw and pig manure

Li Yi¹, Liu Yuqiu¹, Zhang Zhen¹, Yi Weiming²

(1. *Engineering College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;*

2. *Department of Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 250012, China*)

Abstract: Rural household biogas fermentation materials are mainly manure in China. Biogas plants cannot run steadily due to shortage of manure. Straw are rich in China, and anaerobic fermentation with mixed materials of corn straw and pig manure can be used to supplement fermentation materials. Thus it is important to study on optimization of mixed material of corn straw and pig manure. In this study, we conducted the experiments through the earlier single factor test. Quadratic regression orthogonal rotating combination design was adopted and the whole gas production was taken as the response value. Effects of four factors on anaerobic fermentation were analyzed. These four factors included ratio of corn straw and pig manure, temperature, pH, and ratio of inoculum and quality of raw fermentation material. The mathematical model for mixed fermentation of corn straw and pig manure was developed. The regression equation was optimized and analyzed when the optimum conditions and interactive effects were exposed. The optimum conditions for mixed-fermentation were determined as follows: the ratio of corn straw to pig manure was 1, pH value was 7.5, the ratio of inoculum volume and quality of raw fermentation material was 50%, the temperature was 30 °C, and biogas production obtained is 18.51 L. The order of the influence of four factors on mixed-fermentation of corn straw and pig manure was: ratio of corn straw and pig manure, temperature, ratio of corn straw and pig manure, and pH value. Comparing with interactive effects of corn straw and pig manure raw material ratio, pH, raw material ratio and temperature on biogas yield including corn straw and pig manure raw material ratio and inoculum volume, pH and inoculum volume, pH and temperature, the effect of inoculum volume and temperature was not significant. During the optimum biogas production process in this experiment, the relative error of gas production between model prediction and experiment measurement was less than 5%. This study is expected to provide references for improving biogas production and fermentation efficiency of mixed material of corn straw and pig manure.

Key words: biogas; straw; fermentation; manures; optimization

(责任编辑:王 柳)