

王粟,李家磊,史风梅,等.玉米秸秆生物炭与牛粪混合厌氧发酵工艺优化[J].黑龙江农业科学,2020(6):87-92,93.

# 玉米秸秆生物炭与牛粪混合厌氧发酵工艺优化

王粟<sup>1</sup>,李家磊<sup>2</sup>,史风梅<sup>1</sup>,裴占江<sup>1</sup>,刘长军<sup>3</sup>,刘杰<sup>1</sup>

(1.黑龙江省农业科学院农村能源与环保研究所/农业农村部种养结合重点实验室/黑龙江省秸秆能源化重点实验室,黑龙江哈尔滨 150086;2.黑龙江省农业科学院食品加工研究所,黑龙江哈尔滨 150086;3.黑龙江省农村能源总站,黑龙江哈尔滨 150008)

**摘要:**为提高厌氧发酵产气效率,在单因素试验基础上,采用响应面法对厌氧发酵工艺参数进行优化,通过 Box-Behnken 中心组合试验设计,以厌氧发酵产气量为响应值,研究发酵温度、总固体浓度和生物炭添加量 3 个因素对厌氧发酵的影响,建立相关数学模型,并进行试验验证。结果表明:3 个因素对厌氧发酵产气效率的影响均达到显著水平,最优工艺条件为发酵温度 40 ℃,总固体浓度 8.7%,玉米秸秆炭 7.8%,在此工艺条件下,厌氧发酵平均产气量达到 2 544 mL,与预测产气量 2 451 mL,两者偏差为 3.8%。因此,所建模型能较好的用于生物炭与牛粪混合厌氧发酵产气量的预测。

**关键词:**玉米秸秆;生物炭;牛粪;厌氧发酵;工艺优化

近年来,我国规模化养殖业发展迅猛,畜禽粪污年产量已达 40 亿 t 左右<sup>[1]</sup>,给区域生态环境带来了巨大威胁<sup>[2]</sup>。厌氧发酵技术是处理畜禽粪污的主要途径之一<sup>[3]</sup>,不仅能够制备生物燃气,提供清洁能源,实现畜禽粪污的能源转换<sup>[4]</sup>,还可消除畜禽粪污随意堆置丢弃所引发的一系列环境污染问题。为了提高厌氧发酵效率,国内外研究多采用投放金属离子等外源添加剂<sup>[5-6]</sup>,从而达到提升微生物活性,增强体系缓冲能力的目的,但同时也提高了处理成本,且重金属等有毒有害物质的增加或富集,也为沼渣沼液还田使用带来一定的安全风险<sup>[7]</sup>。

生物炭是生物质在缺氧或绝氧条件下不完全燃烧所生成的固态炭质,具有可溶性低、高度羧酸酯化和芳香化结构,大孔隙度和比表面积,富含多种微量元素和小分子有机物等特点<sup>[8]</sup>,并已在土壤修复、植物营养及污水处理等领域应用研究获得了一定成果<sup>[9-11]</sup>。近年来,国内外学者利用生物炭在厌氧发酵方面进行了探索和研究,冯晶等<sup>[12]</sup>利用不同材质制备的生物炭材料,强化有机废弃物厌氧发酵,发现并阐述了生物炭可有效提

升厌氧发酵系统酸、氨等抑制物质的缓冲能力,可为微生物提供良好的生长载体,增强微生物种间电子传递的介质;许彩云等<sup>[13]</sup>研究了麦秸生物炭材料对猪粪中温厌氧发酵的影响,生物炭的添加可有效缩短厌氧发酵的延滞期,产气量较纯猪粪处理提高了 77%~96%;潘君廷等<sup>[14]</sup>研究了添加生物炭对鸡粪厌氧消化的影响,其产气率提高了 45%,氨氮浓度得到了很好的抑制;Michael 等<sup>[15]</sup>发现,添加生物炭原料可减少柑橘皮废料厌氧发酵迟滞期达 9.4 d,D-柠檬烯吸附和微生物固定化的协同作用在生物炭的影响,甲烷产量可提高 13%左右;石笑羽等<sup>[16]</sup>添加生物炭强化餐厨垃圾厌氧发酵效率,其表面金属元素和官能团使其具有较高的碱度,提高了系统缓冲能力,最大单日甲烷产量可提高 24%。因此,本研究采用玉米秸秆为原料制备生物炭材料,研究其对牛粪厌氧发酵的影响,并利用中心组合设计试验(Box-Behnken Design),运用响应面法,对工艺参数进行优化,以期畜禽粪污的资源化利用和无害化处理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

牛粪取自黑龙江省哈尔滨市双城区米特利农业发展有限公司长产奶牛养殖场,采集后密封于透明聚乙烯袋中,于 4 ℃ 环境保存备用;接种活性污泥取自黑龙江省农业科学院农村能源与环保研究所沼气发酵罐,试验前将接种污泥置于

收稿日期:2020-03-26

基金项目:哈尔滨市创新人才项目(2016RAQYJ070);黑龙江省农业科学院院级课题(2018YYF037);黑龙江省农业科学院优秀团队项目(2019KYJL013,2019CJJL009)。

第一作者:王粟(1984-),男,硕士,助理研究员,从事农村能源与生态环保研究。E-mail:wangsu1688@126.com。

通信作者:刘杰(1974-),男,博士,研究员,从事农村能源与生态环保研究。E-mail:liujie1677@126.com。

35 ℃, 2 Hz 摇床上震荡 24 h, 减少内生沼气对结果的影响<sup>[17]</sup>。

生物炭以黑龙江省农业科学院国家级农业示范园区废弃的玉米秸秆为原料, 粉碎后经 40 目筛筛取留存, 原料经炭化炉, 在 500 ℃ 条件下炭化 20 min, 随后移至炭化炉出气口冷却 5 min, 防止高温炭化产物在空气中自燃。生物炭冷却至室温后, 将其研磨筛选, 采用去离子水洗涤除去灰分<sup>[16]</sup>, 在 100 ℃ 烘箱中烘干后备用。试验材料物化性质如表 1 所示。

### 1.2 试验装置

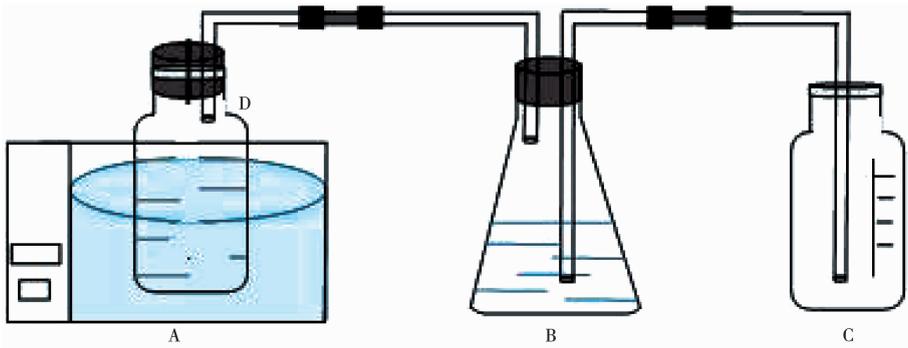
试验采用 500 mL 广口瓶为厌氧发酵反应容器, 反应体系为 350 mL, 采用排饱和食盐水法收

集沼气, 发酵瓶、集气瓶与计量瓶之间以乳胶管连接, 装置密封口用石蜡密封, 使用前进行漏气检测, 以保证装置密封性, 实验装置见图 1<sup>[4]</sup>。

表 1 试验原料基本性质

Table 1 The basic properties of raw materials

材料 Materials	干物质含量 Dry matter content/%	挥发性固体含量 Volatile solid content/%	pH
牛粪 Cow manure	23.5	92.8(干基)	7.6
接种污泥 Sludge	9.1	7.8	6.9
玉米秸秆生物炭 Corn straw biochar	96.3	82.4	8.1



A: 恒温水浴锅; B: 集气瓶; C: 计量瓶; D: 发酵瓶  
A: constant temperature water bath; B: gas cylinder; C: measuring cylinder; D: fermentation cylinder

图 1 试验装置

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

### 1.3 方法

1.3.1 单因素试验设计 以玉米秸秆制备的生物炭为原料, 在牛粪底物干物质含量浓度为 6%, 培养温度 30 ℃, 运行至反应启动后第 30 天条件下, 根据生物炭投放量的不同(2%、4%、6%、8%、10%、12%、15%), 以累计产气量作为评价标准, 确立生物炭对牛粪沼气发酵效果的影响; 以 TS、发酵温度作为基本参数, 在一定范围内, 调整单一因素的数值, 研究其对沼气发酵产气量的影响, 每处理 3 次重复, 接种时厌氧瓶内充入 500 mL·min<sup>-1</sup> 氮气, 保持 6 min 以上, 使反应系统处于严格的厌氧环境。

1.3.2 响应面试验设计 以单因素试验为依据, 根据 Box-Behnken 中心组合进行 3 因素 3 水平试验设计, 选取生物炭添加量、发酵温度和牛粪底物干物质含量浓度 3 种沼气发酵因素作为自变量, 分别以 A、B、C 表示, 以 -1、0、1 表示 3 个自变量

的 3 个水平, 以气体产气量为响应值 Y, 运用 Design Expert 8.0 软件程序, 确定玉米秸秆生物炭与牛粪混合厌氧发酵最佳工艺条件。

1.3.3 测定项目及方法 总固体含量(TS) 采用烘干法测定; 挥发性固体含量(VS) 采用灼烧法测定; 液体 pH 采用 pH 计( PHS-3G 型)检测; 生物炭 pH 检测, 采用生物炭与超纯水质量体积 1:10 比例混合, 于振荡器中震荡 4 h, 用 pH 计测定上清液 pH; 沼气产量采用排水法测定<sup>[14-17]</sup>。

1.3.4 数据分析 利用 Design Expert 8.0 软件进行响应面分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素对厌氧发酵效率的影响

以玉米秸秆生物炭原料的投加浓度比例(以干物质含量计)为基本参数, 当牛粪底物干物质含量浓度为 6%, 发酵温度为 35 ℃ 条件下, 以累计产气量为评价指标, 研究其对厌氧发酵效果的影

响。由图 2 可知,沼气发酵产气量随着玉米秸秆生物炭添加比例的增加呈现先升高后降低的趋势,当投放比例在 8% 时,累计产气量最高达 2 580 mL,容积产气率为  $0.24 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 。因此,确定玉米秸秆炭,添加比例为 8% (以干物质含量计) 最为适宜。

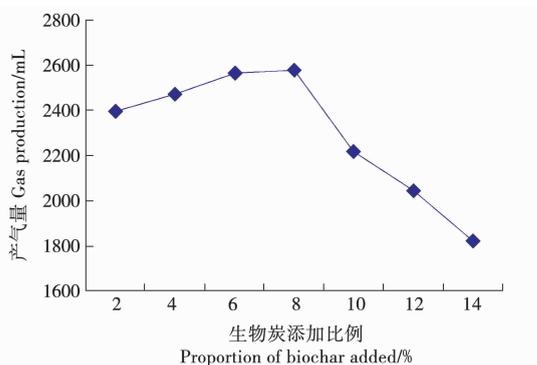


图 2 生物炭对厌氧发酵产气量的影响

Fig. 2 Effects of biochar on anaerobic fermentation gas production

在一定范围内,对其中任一项因素进行调整,并固定其他因素为 0 水平,以累计产气量为评价指标,进行单因素试验。在秸秆生物炭添加浓度为 6%,培养温度  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,运行至反应启动后第 30 天条件下,以不同的牛粪原料干物质含量浓度(2%、4%、6%、8%、10%和 12%)为基本参数,研究牛粪底物干物质含量浓度对厌氧发酵的影响,由图 3 可知,产气量随着牛粪干物质含量浓度的增大呈现先上升后大幅下降的趋势,牛粪干物质含量在 6% 时为适宜浓度。在 TS 牛粪底物浓度为 6%,秸秆生物炭添加浓度为 6%,运行至反应启动后第 30 天条件下,以发酵温度(15, 20, 25, 30, 35, 40 和  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ )为基本参数,考察发酵温度对厌氧发酵的影响,由图 3 可知,产气量随着发酵温度的增加,呈现先大幅升高后,发酵温度达到  $30 \text{ }^\circ\text{C}$

后,逐渐趋于平缓的趋势,发酵温度为  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  时为最适发酵温度。

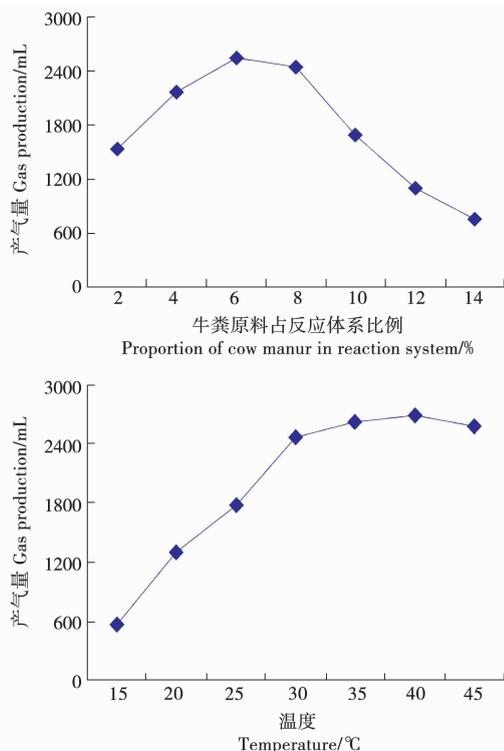


图 3 底物浓度及温度对厌氧发酵产气量的影响

Fig. 3 Effects of substrate concentration and temperature on anaerobic fermentation gas production

## 2.2 Box-Behnken 试验结果分析

在单因素试验基础上,进行响应面 Box-Behnken 试验,试验设计的因素与水平如表 2 所示,试验各因素及其试验结果见表 3。利用 Design-Expert V 8.0.6.1 软件对表 2 的试验结果进行次多项式回归模型方程拟合,获得回归模型方程为:  

$$Y = 2439.6 - 40.38A + 42.63B + 38.75.38C - 39.75AB + 70.5AC + 42.5BC - 141.93A^2 - 239.43B^2 - 52.68C^2$$

表 2 Box-Behnken 设计试验因素与水平

Table 2 Factors and their levels used for Box-Behnken design

因素 Factors	水平 Levels		
	-1	0	1
玉米秸秆生物炭(以干物质含量计) Concentration of corn straw biochar (calculated by dry matter content)	6	8	10
发酵温度 Temperature/ $^\circ\text{C}$	35	40	45
牛粪干物质含量 Dry matter content of cow manure/%	6	8	10

通过对方程进行方差分析,由表 4 可知,模型  $F$  值为 27.37,  $P < 0.0001$ , 差异显著,而失拟项中  $F$  值为 0.20,  $P = 0.894$  大于 0.05, 差异不显著,说明该二次回归方程模型可信度高,误差较小,可

以进行优化分析。模型决定系数  $R^2 = 0.9056$ , 调整决定系数  $R_{adj}^2 = 0.9368$ , 说明响应值 93.68% 来源于所选因素,说明试验数据合理,可重复性较好,所建模型能够很好地反映响应值的

表 3 各因素组合及结果

Table 3 Factors combination and experiment results

试验组 Treatment groups	玉米秸秆生物炭浓度(以干物质含量计) Concentration of corn straw biochar (calculated by dry matter content)	温度 Temperature	牛粪干物质含量 Dry matter content of cow manure	产气量 Gas production/mL
1	0	0	0	2409
2	0	1	-1	2302
3	0	1	1	2104
4	-1	1	0	2442
5	0	-1	-1	2091
6	1	1	0	2329
7	0	-1	1	2018
8	1	-1	0	2162
9	-1	0	-1	2392
10	1	0	-1	2084
11	0	0	0	2526
12	-1	0	1	2258
13	0	0	0	2019
14	0	0	0	2276
15	-1	-1	0	2429
16	0	0	0	2126
17	1	0	1	2034

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Variance analysis of regression model

方差源 Variance source	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F	P
模型	435305.90	48367.33	27.37	0.0001
A	13041.13	13041.13	7.38	0.0299*
B	14535.13	14535.13	8.22	0.0241*
C	12012.50	12012.50	6.80	0.0351*
AB	6320.25	6320.25	3.58	0.1005
AC	19881.00	19881.00	11.25	0.0122*
BC	4225.00	4225.00	2.39	0.1660
A <sup>2</sup>	84811.39	84811.39	47.99	0.0002**
B <sup>2</sup>	241365.60	241365.60	136.56	0.0001**
C <sup>2</sup>	11682.76	11682.76	6.61	0.0370*
残差	12371.95	1767.42	-	-
失拟	1586.75	528.92	0.20	0.8940
误差	10785.20	2696.30	-	-
总和	447677.90	-	-	-

注: \* 表示  $P < 0.05$  差异显著, \*\* 表示  $P < 0.01$  差异极显著。

Note: \* indicates that there is a significant difference in  $P < 0.05$ , \*\* indicates that there is a significant difference in  $P < 0.01$ .

变化。由  $P$  值结果可知,模型中  $A^2$ 、 $B^2$  对厌氧发酵产气效果影响极显著,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $AC$ 、 $C^2$  对产气效果影响显著,其余因素不显著。由  $F$  值大小可知,对厌氧发酵影响强弱的顺序为  $B > A > C$ ,即发酵温度  $>$  玉米秸秆炭浓度  $>$  牛粪干物质含量浓度。

### 2.3 因素交互作用分析

根据回归方程,利用 Design Expert8.0 软件进行响应面试验,所得各因子响应面分析及等高线图,各因素交互作用产生的等高线为椭圆状,表明两者交互作用对厌氧发酵产气效果影响显著。由图 4 可知,发酵温度与玉米秸秆炭两者交互,产气量随着发酵温度与秸秆炭添加浓度的升高呈现逐渐增加的趋势,达到最大值后缓慢下降,同时,厌氧发酵产气量对温度的变化比玉米秸秆炭添加量的变化敏感。

牛粪底物干物质含量浓度与玉米秸秆炭两者交互对厌氧发酵产气效果的影响,由图 5 可知,产气量随着牛粪底物干物质含量浓度和玉米秸秆炭添加浓度的升高呈现缓慢增加的趋势,当达到最大值后,厌氧发酵产气效果对玉米秸秆炭浓度增加更加敏感,产气量随着浓度的增加呈现快速下降的趋势。

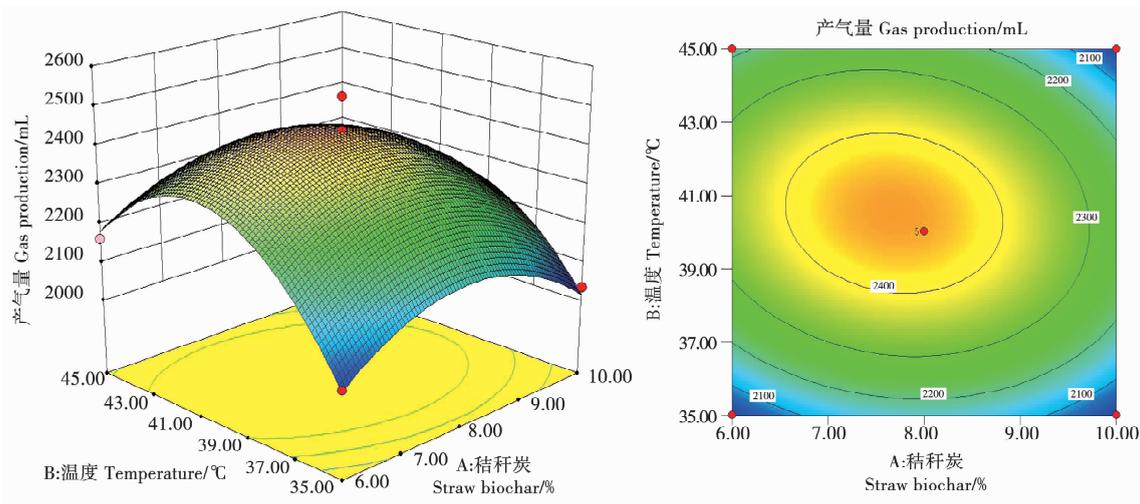


图 4 温度与秸秆炭两因素交互作用的响应面和等高线  
 Fig. 4 Response surface and contour of the interaction between temperature and straw biochar

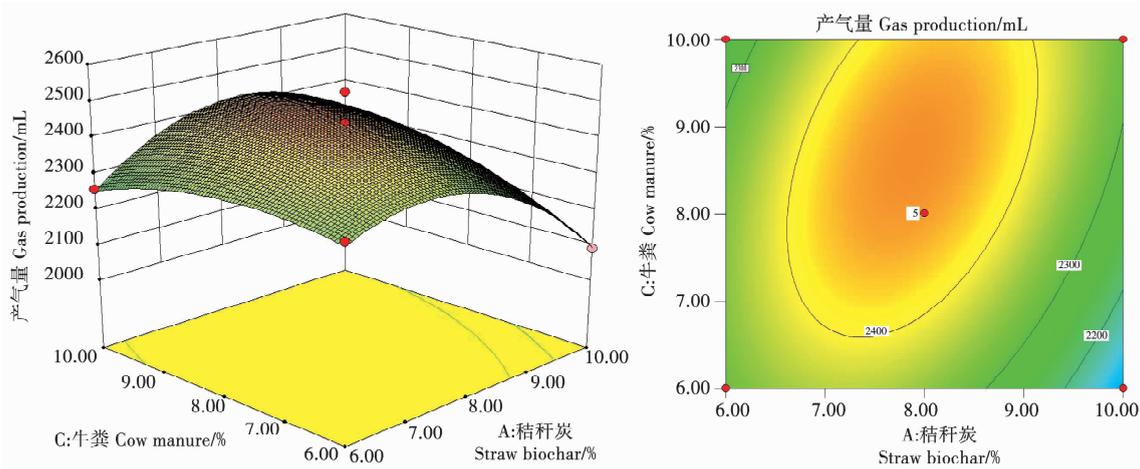


图 5 牛粪与秸秆炭两因素交互作用的响应面和等高线  
 Fig. 5 Response surface and contour of the interaction between cow manure and straw biochar

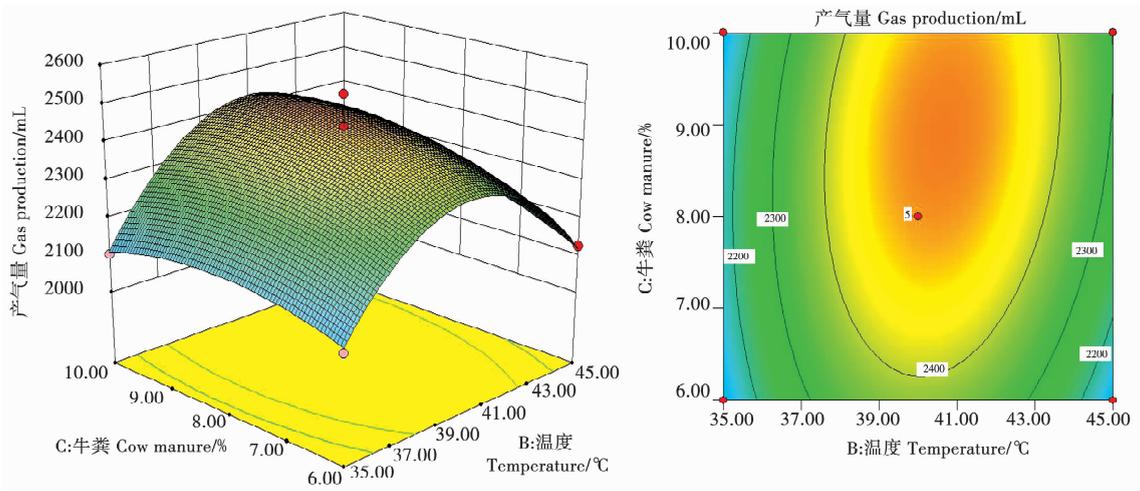


图 6 牛粪与温度两因素交互作用的响应面和等高线  
 Fig. 6 Response surface and contour of the interaction between cow manure and fermentation temperature

由图6可知,厌氧发酵产气效果随着牛粪底物干物质含量浓度和发酵温度的提高呈现先上升后下降的趋势,而厌氧发酵产气效果对发酵温度变化比牛粪底物干物质含量浓度变化更加敏感。

#### 2.4 模型优化

通过模型优化,最优工艺条件预测为发酵温度40℃,牛粪底物干物质含量为8.7%,玉米秸秆炭(以TS计)为7.8%,预测产气量为2451 mL。为了验证优化条件的准确性和可靠性,在最优工艺条件下进行厌氧发酵验证试验,试验设置3次重复取平均值,获得试验数据值为2544 mL,与方程预测值误差为3.8%,在允许范围内,说明响应面设计模型条件可取。

### 3 结论

基于单因素试验,采用响应面法对不同发酵温度、牛粪底物干物质含量浓度和生物炭添加量的厌氧发酵工艺参数进行优化研究,并对不同影响因素进行拟合,确定各响应变量间的交互关系。结果表明,3种厌氧发酵因素对产气效果影响均达到显著,影响程度强弱的顺序为发酵温度>玉米秸秆炭浓度>牛粪底物干物质含量浓度。通过两两交互分析,发现牛粪与玉米秸秆炭混合厌氧发酵时达到显著水平,而产气效果对发酵温度的影响更为敏感,说明在适宜的发酵温度和牛粪底物干物质含量浓度下,厌氧发酵产气量会随着玉米秸秆炭的浓度升高而升高。通过试验,筛选出最佳工艺条件为发酵温度40℃,TS为8.7%,玉米秸秆炭(以干物质含量计)为7.8%,该条件下,沼气发酵预测产气量为2451 mL。

#### 参考文献:

- [1] 王铁灵. 畜禽养殖污染的有效治理策略[J]. 中国畜牧业, 2016(21):38-40.
- [2] 王菲,鲁琳,刘克锋,等. 牛粪与秸秆干法厌氧发酵体系中含固率对产气及造肥的影响[J]. 中国乳业, 2019(7):46-50.
- [3] You Z, Pan S, Sun N, et al. Enhanced corn-stover fermenta-

tion for biogas production by NaOH pretreatment with CaO additive and ultrasound[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 238:117813.

- [4] 卢玢宇,裴占江,史风梅,等. 响应面法优化猪粪沼气发酵工艺[J]. 中国沼气, 2018, 36(4):7-12.
- [5] 杨立. 秸秆厌氧发酵产沼气工艺中关键因子的研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2009.
- [6] 白顺星,龚舒静,杨姝,等. 组合外源添加剂对杂交狼尾草厌氧发酵产沼气的的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5):958-964.
- [7] 涂成,闫湘,李秀英,等. 沼渣沼液农用安全风险[J]. 中国土壤与肥料, 2018(4):8-13, 27.
- [8] 黄玉威. 生物炭微观解剖结构表征及理化性质研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2018.
- [9] 陈旭,张璐. 生物炭基质潮汐流人工湿地处理生活污水性能[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7):1443-1449.
- [10] Kasozi G N, Zunmerman A R, Nkedi K, et al. Catechol and humic acid sorption onto arrange of laboratory-produced black carbons (biochars) [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44: 6189-6195.
- [11] 周慧华,袁旭音,熊钰婷,等. 生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(2):914-921.
- [12] 冯晶,荆勇,赵立欣,等. 生物炭强化有机废弃物厌氧发酵技术研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12):256-264.
- [13] 许彩云,靳红梅,常志州,等. 麦秸生物炭添加对猪粪中温厌氧发酵产气特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1167-1172.
- [14] 潘俊廷,邱凌, Hassanein A A M, 等. 生物炭添加对鸡粪厌氧消化产期特性的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 12(45):229-233.
- [15] Fagbohunge M O, Herbert B M J, Hurst L, 等. 生物炭在柑橘皮厌氧发酵中作用机理研究[J]. 中国沼气, 2019, 37(5):84-88.
- [16] 石笑羽,王宁,陈钦冬,等. 生物炭加速餐厨垃圾厌氧消化的机理[J]. 环境工程学报, 2018, 12(11):3204-3212.
- [17] 王粟,裴占江,史风梅,等. 生物炭对餐厨垃圾厌氧消化的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(4):55-57.

## Optimization of Mixed Anaerobic Fermentation with Corn Straw Biochar and Cow Manure

WANG Su<sup>1</sup>, LI Jia-lei<sup>2</sup>, SHI Feng-mei<sup>1</sup>, PEI Zhan-jiang<sup>1</sup>, LIU Chang-jun<sup>3</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>

(1. Rural Energy and Environmental Protection Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop and Livestock Integration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China / Key Laboratory of Straw Energy of Heilongjiang Province, Harbin 150086, China; 2. Food Processing Institute of Heilongjiang Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 3. Heilongjiang Rural Energy Station, Harbin 150008, China)

刘国敏,吴玉,郑虚,等.桂彩薯1号马铃薯花色苷提取方法的比较及降解影响因子研究[J].黑龙江农业科学,2020(6):93-97.

# 桂彩薯1号马铃薯花色苷提取方法的比较及降解影响因子研究

刘国敏<sup>1</sup>,吴玉<sup>2</sup>,郑虚<sup>1</sup>,叶亦心<sup>2</sup>,韦兰刚<sup>2</sup>,石达金<sup>3</sup>,闫飞燕<sup>3</sup>,邓英毅<sup>2</sup>

(1. 广西农业科学院经济作物研究所,广西南宁530007;2. 广西大学农学院,广西南宁530004;3. 广西农业科学院玉米研究所,广西南宁530007)

**摘要:**为开发利用马铃薯新品种桂彩薯1号花色苷及研究其储存条件,以桂彩薯1号和紫云1号为研究对象,采用两种不同花色苷提取液进行提取比较,T1:1.5 mol·L<sup>-1</sup> HCl:95%乙醇=15:85(体积比),pH1.0;T2:1% HCl 甲醇溶液,pH1.0,并对T1提取的桂彩薯1号花色苷提取液进行3个环境条件处理,分别为室温(25~30℃)自然光,4℃低温自然光,4℃低温黑暗,在放置天数为2,5,7,15和75 d时进行花色苷含量测定,观察花色苷降解过程,对马铃薯块茎中花色苷的提取方法进行比较,并对其提取后的降解影响因子等进行分析研究。结果表明:不同提取方法差异显著,用盐酸甲醇(T2)作提取液提取出的花色苷含量显著高于盐酸乙醇(T1);温度和光照均能影响马铃薯花色苷的降解,但温度影响效应大于光照。

**关键词:**马铃薯;花色苷;光照;温度;降解

马铃薯又名洋芋或土豆,被誉为21世纪最有发展前景的经济作物之一<sup>[1]</sup>,也被称为“地球未来的粮食”<sup>[2-3]</sup>。2015年我国将马铃薯列为继小麦、玉米和水稻之后的第四大主粮作物<sup>[4-5]</sup>。近年来,紫色马铃薯因其富含花色素渐为人所知,并且发展迅速,市场上涌现出各种各样的新品种,其中,

桂彩薯1号是广西农业科学院经济作物研究所从2005年开始通过马铃薯资源的引进、筛选与创新研究而选育出的新品种,2013年通过省级品种审定,据检测桂彩薯1号块茎中花色苷含量为178.6 mg·100 g<sup>-1</sup> FW<sup>[6]</sup>,是目前我国花色苷含量最高的马铃薯品种。花色苷是花色素与糖,以糖苷键结合而成的一种水溶性色素,属类黄酮化合物,广泛存在于植物的花、果实、茎、叶和根器官的细胞液中,使其呈现由红、紫红到蓝等不同颜色<sup>[7]</sup>。花色苷除了赋予植物丰富的色彩外,还可吸引昆虫传粉,提高植物的光保护能力、抗冻能力、抗旱能力、抗氧化能力及抗菌抗虫能力等<sup>[8]</sup>。同时,研究还表明,花色苷对人体具有许多保健功能如强抗氧化,清除自由基能力,预防心血管疾病、抗肿瘤、抗突变和辐射、调节血小板活性、防血

收稿日期:2019-12-18

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项经费(201503001-5,20150312713);广西创新驱动发展专项;广西科技重大专项(桂科AA17204054);国家现代农业产业技术体系广西薯类创新团队建设专项(nycytgxxtid-11-02);广西农业科学院基本科研业务专项(2015YT62);广西农业科学院基本科研业务专项(桂TS201432)。

第一作者:刘国敏(1989-),女,硕士,助理研究员,从事作物栽培与生理生态研究。E-mail:1158593947@qq.com。

通信作者:邓英毅(1972-),女,博士,副教授,从事园艺植物育种与栽培生理研究。E-mail:yingyideng@163.com。

**Abstract:** In order to improve the biogas yield, response surface methodology was used to optimize the parameters of anaerobic fermentation. Based on Box-Behnken central combination experiment design, the effects of fermentation temperature, total solid concentration and biochar dosage on biogas yields were studied. The relevant mathematical model was established and validated by experiments. The results showed that the effects of three factors on the biogas yield were all significant. The optimum conditions were: fermentation temperature 40℃, total solid concentration 8.7%, and corn straw carbon 7.8%. The average biogas yield reached 2544 mL under the optimal condition and the deviation between predicted value and experimental biogas yield 2451 mL was 3.8%. It was proved that the model can be used to predict the biogas yield of biochar-cow manure by anaerobic fermentation.

**Keywords:** corn straw; biochar; cow manure; anaerobic fermentation; parameter optimization