

马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化工艺参数优化

葛一洪^{1,2} 邱凌^{1,2} A. A. M. Hassanein^{2,3} 周彦峰^{2,4} 梁勇^{2,4}

- (1. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100;
- 2. 西北农林科技大学农业部农村可再生能源开发利用西部科学观测实验站, 陕西杨凌 712100;
- 3. 苏伊士运河大学机械与电子工程学院, 伊斯梅利亚 415223;
- 4. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探索马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化产气特性和优化工艺参数,采用二次正交旋转组合设计,研究了物料质量分数、碳氮比和接种物质量分数3个因素对马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化产气特性及其规律,以总固体产气率为响应值得出二次回归模型和优化工艺参数,并采用 Design-Expert 软件对回归模型进行了优化和降维分析。通过上述试验研究,得到最佳工艺条件为:物料质量分数为9.87%、碳氮比为18.73、接种物质量分数为20.82%,预测总固体产气率为54.55 mL/g。3个因素影响主次顺序依次为接种物质量分数、物料质量分数和碳氮比,各因素间交互作用以接种物质量分数与物料质量分数的交互作用最明显。通过验证试验得出,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。

关键词: 马铃薯茎叶; 玉米秸秆; 厌氧消化; 工艺优化

中图分类号: X71; S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0173-07

Optimization of Anaerobic Digestion Parameters with Mixed Material of Potato Stem Leaf and Corn Straw

Ge Yihong^{1,2} Qiu Ling^{1,2} A. A. M. Hassanein^{2,3} Zhou Yanfeng^{2,4} Liang Yong^{2,4}

- (1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
- 2. Western Scientific Observing and Experimental Station for Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
- 3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Suze Canal University, Ismailia 415223, Egypt
- 4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: According to FAOSTAT 2014, the production of potato is huge in China, which was almost 96.136 3 Mt/a, accounting for 24.97% of global production, but subsequently lots of potato stem leaves were produced and had not been effectively utilized. At the same time, the corn straw is also a kind of huge reserve of rural biomass energy, of which the production was about 44 Mt/a. The potato planting area in China reached 5.647 Mhm². Southwest mountainous area, northwest area, Inner Mongolia and northeast area are the main planting areas of potatoes, of which the cultivated area approximately accounted for 62% of total potato planting area in China. Thus, large-scale biogas project in these areas can be built by using potato stem leaf as a kind of raw material for anaerobic digestion, which is an efficient path for potato stem leaf recycling. Therefore, based on the early single factor experiment, the parameters optimization of anaerobic digestion process which used potato stem leaf mixed with corn straw as raw material was studied. The quadratic regression orthogonal rotational combination design was used

收稿日期: 2016-01-28 修回日期: 2016-02-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(51576167)
作者简介: 葛一洪(1984—),男,博士生,主要从事生物质能源研究,E-mail: gyhnsuaf@126.com
通信作者: 邱凌(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事生物能源与环境工程研究,E-mail: ql2871@126.com

to determine the influences of material concentration, carbon and nitrogen ratio and inoculum quality percentage on mesophilic anaerobic digestion of potato stem leaf mixed with corn straw. Through the research, the quadratic regression model was optimized and decrease-dimension was analyzed by the software of Design-Expert. The results showed that the optimum conditions were confirmed as material concentration of 9.87%, carbon and nitrogen ratio of 18.73 and inoculum quality percentage of 20.82%. The predicted TS gas production was 54.55 mL/g. In addition, the primary sequence of effect of three factors was inoculum quality percentage, material concentration and carbon and nitrogen ratio. Furthermore, the reciprocal action between inoculum quality percentage and material concentration was obvious. During the verification test, the relative error of TS gas production between model calculation value and experimental value was below 5%. The variance analysis was not significant, and the model matched well with the experiment results.

Key words: potato stem leaf; corn straw; anaerobic digestion; process optimization

引言

2014 年我国马铃薯产量已达到 9 613.63 万 t, 占亚洲总产量的 50.94%, 占全球总产量的 24.97%^[1-2]。马铃薯茎叶的鲜重约占整株马铃薯鲜重的 1/4, 即我国每年约有 3 204.54 万 t 马铃薯茎叶产生。虽有部分马铃薯茎叶可用于青贮饲料, 但其茎叶适口性差且含有大量龙葵素(研究表明, 马铃薯茎叶中龙葵素最高可达 1 015 mg/kg)^[3-4]。因此马铃薯茎叶更多是以废弃或焚烧的方式处理, 造成极大的生物质能源浪费和环境污染。我国马铃薯种植面积达到 564.7 万 hm², 主产区分布在西南山区、西北、内蒙古和东北地区, 约占全国种植面积的 62%^[5]。因此在这些地区将马铃薯茎叶作为规模化沼气工程原料进行厌氧消化处理是使其资源化利用的有效途径^[6-8]。然而马铃薯茎叶含有丰富的粗蛋白和粗纤维, 是一种高氮原料(碳氮比约为 10), 需要混合高碳原料(碳氮比 20~30)促进其厌氧消化过程的整体效能^[9-12]。

玉米秸秆作为一种高碳发酵原料, 我国每年产生约 1.75 亿 t, 其中约 4 400 万 t 未经资源化利用^[13-14]。因此, 进行高氮马铃薯茎叶与高碳玉米秸秆的混合厌氧消化研究, 为马铃薯茎叶的资源化处理, 推动马铃薯主粮化战略的实施有重要的意义^[15-16]。

为获得马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化优化工艺参数, 在完成前期马铃薯茎叶单一成分厌氧消化产气特性研究基础上, 本文参照文献^[17-20]中的二次回归正交旋转组合设计方法, 以总固体产气率(以下称 TS 产气率)为响应值, 继续探究厌氧消化物料质量分数、原料碳氮比和接种物质量分数 3 个因素对马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化 TS 产气率的影响^[21]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

马铃薯茎叶取自陕西杨凌国家农业高新技术产业区现代农业示范园, 取回后自然晒干, 粉碎至 20~30 mm 备用。玉米秸秆取自西北农林科技大学农作一站试验田, 取回后粉碎至 20~30 mm 备用。接种物取自西北农林科技大学农业部农村可再生能源开发利用西部科学观测实验站长期驯化的厌氧污泥。试验原料的成分含量如表 1 所示。

表 1 试验材料特性

Tab.1 Characteristics of experimental materials

原料	总固体质量 分数/%	挥发性固体 质量分数/%	碳氮比
马铃薯茎叶(干)	86.37	60.25	12.6
玉米秸秆	94.26	75.97	53.2
接种物	5.72	3.85	24.6

1.2 试验方案

本研究物料质量分数范围设定为 5%~15%, 而马铃薯茎叶的高氮特性决定了碳氮比调控是其厌氧消化的重要因素之一, 本试验将马铃薯茎叶与玉米秸秆混合原料的碳氮比设定为 10~28。为了探究马铃薯茎叶与玉米秸秆混合原料对接种物的需求量, 将接种物质量分数控制在 10%~30% 之间, 其他厌氧消化参数按常规中温厌氧消化值设定, 试验因素与水平如表 2 所示。

厌氧消化器采用 1 000 mL 发酵瓶, 料液有效容积为 800 mL, 每个厌氧消化器连接一个集气瓶和收集瓶, 相互之间用胶皮管连接密封, 厌氧消化器置于 35℃ 恒温水浴摇床发酵 45 d, 每个处理设置 3 个重复, 试验装置如图 1 所示。

1.3 试验方案设计

运用 Design-Expert 8.0 软件, 按表 2 数据进行

表 2 试验因素与编码

Tab.2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	物料质量分数/%	碳氮比	接种物质量分数/%
1. 682	15. 00	28. 00	30. 00
1	12. 97	24. 35	25. 94
0	10. 00	19. 00	20. 00
- 1	7. 03	13. 65	14. 06
- 1. 682	5. 00	10. 00	10. 00

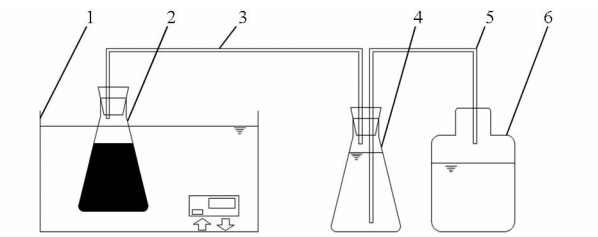


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test unit

1. 可控温不锈钢恒温水浴摇床 2. 发酵瓶 3. 导气管 4. 集气瓶
5. 排水管 6. 收集瓶

二次正交旋转组合试验方案设计。通过试验,以 TS 产气率为响应值,建立多元回归方程,并对其进行检验^[22]。分析不同因素间的交互作用对马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化的影响,最终通过 Design-Expert 软件寻求最优工艺条件。

2 结果与分析

2.1 模型构建

采用 Central composite design (CCD) 试验设计方案对马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化条件进行了优化,并监测其总固体产气率 (TS 产气率),试验设计结构矩阵及试验检测结果如表 3 所示,表中 A、B、C 表示物料质量分数、碳氮比和接种物质量分数编码值,Y 表示 TS 产气率。

根据表 3 的试验结果,用 Design-Expert 软件进行多元线性回归分析,得到的回归模型

$$Y = 54.29 - 2.07A - 1.28B + 2.22C - 3.39AB - 4.46AC + 0.46BC - 16.74A^2 - 9.47B^2 - 9.21C^2$$

(1)

2.2 模型检验

使用 Design-Expert 软件对上述多元回归模型进行拟合方差分析^[23],由表 4 可见各项回归系数的显著性检验结果,回归模型平方和为 7 542. 54,总平方和为 7 693. 25,由此可计算其相关系数 R 为 0. 980 4,查表可知 $R > R_{0.01} = 0. 836$,则 $P < 0. 01$,表明该回归模型拟合效果良好。

根据表 4 中各项系数的显著性检验结果,将不显著项剔除后,得到简化模型

表 3 二次正交旋转组合设计试验结果

Tab.3 Test results and parameters of orthogonal rotation regression analysis

试验编号	A	B	C	Y/(mL·g ⁻¹)
1	- 1	- 1	- 1	12. 51
2	1	- 1	- 1	20. 89
3	- 1	1	- 1	11. 01
4	1	1	- 1	12. 71
5	- 1	- 1	1	21. 79
6	1	- 1	1	19. 21
7	- 1	1	1	29. 03
8	1	1	1	6. 01
9	- 1. 682	0	0	13. 85
10	1. 682	0	0	6. 30
11	0	- 1. 682	0	31. 18
12	0	1. 682	0	30. 08
13	0	0	- 1. 682	27. 96
14	0	0	1. 682	34. 76
15	0	0	0	50. 93
16	0	0	0	54. 10
17	0	0	0	54. 36
18	0	0	0	53. 88
19	0	0	0	53. 81
20	0	0	0	53. 71
21	0	0	0	56. 14
22	0	0	0	54. 36
23	0	0	0	56. 24

表 4 回归模型的方差分析

Tab.4 ANOVA of regression model

变异来源	平方和	自由度	均方差	F	P
A	58. 32	1	58. 32	5. 03	0. 043 0
B	22. 41	1	22. 41	1. 93	0. 187 8
C	67. 49	1	67. 49	5. 82	0. 031 3
AB	92. 05	1	92. 05	7. 94	0. 014 5
AC	159. 21	1	159. 21	13. 73	0. 002 6
BC	1. 72	1	1. 72	0. 15	0. 706 7
A ²	4 452. 71	1	4 452. 71	384. 08	<0. 000 1
B ²	1 426. 36	1	1 426. 36	123. 03	<0. 000 1
C ²	1 348. 93	1	1 348. 93	116. 36	<0. 000 1
模型	7 542. 54	9	838. 06	72. 29	<0. 000 1
残差	150. 71	13	11. 59		
失拟	131. 53	5	26. 31	10. 97	0. 002 0
误差	19. 18	8	2. 40		
总计	7 693. 25	22			

$$Y = 54.29 - 2.07A + 2.22C - 3.39AB - 4.46AC - 16.74A^2 - 9.47B^2 - 9.21C^2$$

(2)

2.3 单因素效应分析

根据式(1)中一次项系数的绝对值大小及预测模型进行主效应分析可得,各因素对厌氧消化 TS 产气率的影响由大到小依次为接种物质量分数、物料质量分数、碳氮比。参照文献[24]中的降维分析方

法,得出单一因素对马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化 TS 产气率的影响,即将其中 2 个因素控制在

相同的水平上,得出另一因素与 TS 产气率的一元回归模型,并做出相应曲线,结果如图 2 所示。

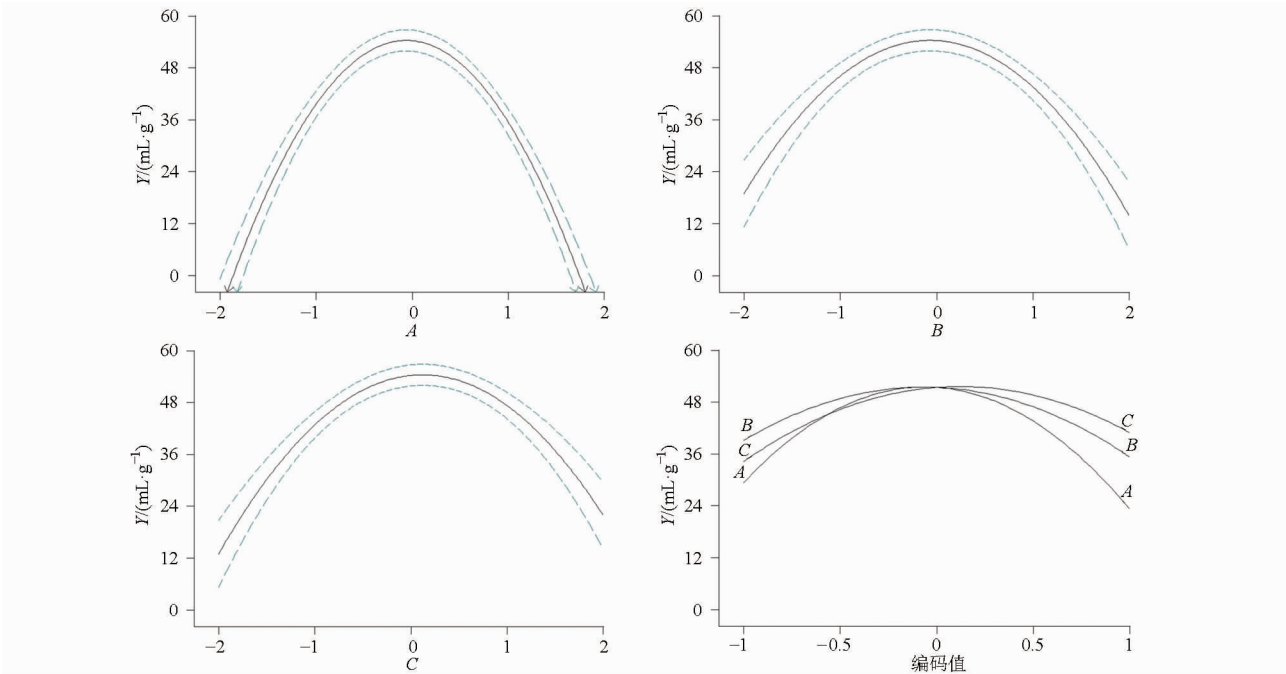


图 2 单因素与 TS 产气率关系

Fig. 2 Relationships between each factor and TS gas product rate

图 2 为将其他因素控制在零水平时,得出的另一因素的一维模型曲线,通过对各因素一次回归方程求导,可以得出当物料质量分数编码值达到 -0.075 时,即物料质量分数为 9.78% 时 TS 产气率最高,为 54.04 mL/g ;当碳氮比编码值为 -0.05 时,即实际值为 18.73 时,TS 产气率达最高(54.33 mL/g);当接种物质量分数编码值为 0.137 时,即实际值为 20.82% 时,TS 产气率达到最高(54.42 mL/g)。

由图 2 还可得出,物料质量分数高于 9.78% 后 TS 产气率开始从上升变成下降,说明物料质量分数的提高促使马铃薯茎叶中所含龙葵素的浓度也相应升高,可能对厌氧消化微生物起到了抑制作用导致 TS 产气率降低;而碳氮比从低到高的变化导致 TS 产气率先升高再降低说明马铃薯茎叶与玉米秸秆混合的比例影响其厌氧消化微生物生长所需营养物质的平衡,混合比例过高或过低都将导致 TS 产气率的降低;接种物质量分数从 10% 到 20.82% TS 产气率都是逐渐升高,大于 20.82% 后就开始有逐步下降的趋势,说明微生物菌群数量的变化影响 TS 产气率的高低,足够数量的菌群数可提高 TS 产气率,并维持在一定较高水平,但数量过多则会导致微生物之间产生种间竞争,对厌氧消化起到抑制作用,反而影响其 TS 产气率。

2.4 交互因素效应分析

采用响应面法通过 Design-Expert 数据处理系

统对 3 个因素两两之间的交互效应进行分析处理,得到因素之间相互作用的响应曲面图和等高线图。由响应曲面坡度的陡缓程度可以确定响应值对两两因素间交互作用的敏感程度,坡度越陡交互作用越敏感,反之因素间交互作用对响应值的影响就越小;而等高线图则可知两两因素在何范围内交互作用最明显,即可获得较高的 TS 产气率。马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化的物料质量分数、碳氮比和接种物质量分数两两之间交互作用的响应曲面图和等高线图如图 3~5 所示。

结合图 3a、图 4a 和图 5a 可看出 TS 产气率都是随着物料质量分数、碳氮比、接种物质量分数 3 个因素的增加先升高后降低;图 3a 中 A 与 C 响应曲面的坡度较大,其次是图 4a 中 A 与 B 响应曲面,而 B 与 C 的坡度最缓;结合表 4 中各项回归系数显著性检验结果,AC 的 P 值为 0.0026 ,AB 的 P 值为 0.0145 ,BC 的 P 值为 0.7067 ,进而说明 A 与 C 的交互作用对 TS 产气率影响最明显,其次是 A 与 B,对 TS 产气率影响最小的是 B 与 C。

由等高线图 3b 可看出,A 在 $-0.57 \sim 0.47$ 之间,B 在 $-0.74 \sim 0.62$ 之间,即物料质量分数在 $8.29\% \sim 11.39\%$ 之间,碳氮比在 $15.03 \sim 22.31$ 之间,TS 产气率较高,能达到 50 mL/g 以上。图 4b 表明,A、C 分别在 $-0.61 \sim 0.45$ 和 $-0.58 \sim 0.85$ 之间,即物料质量分数在 $8.19\% \sim 11.35\%$ 之间,接种

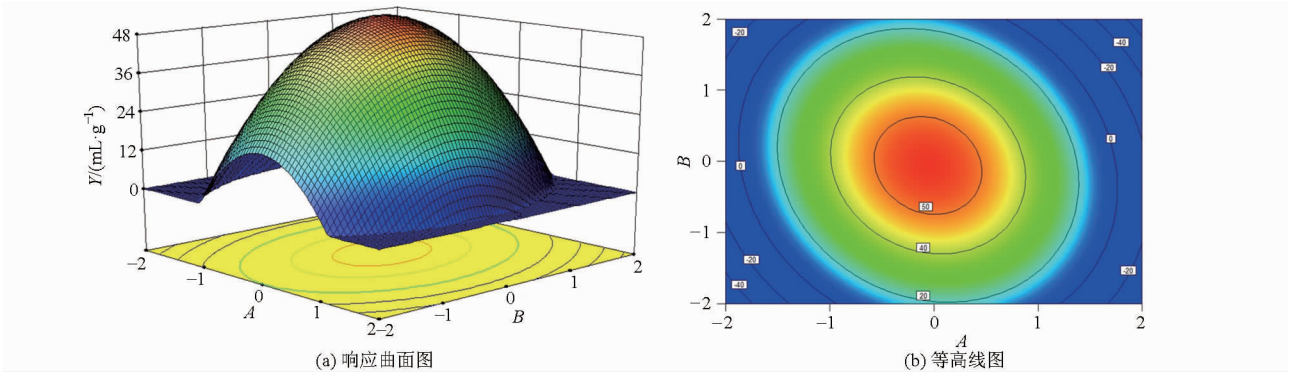


图 3 物料质量分数-碳氮比交互因素效应图

Fig. 3 Response surface chart and contour chart of substrate concentration and C/N ratio

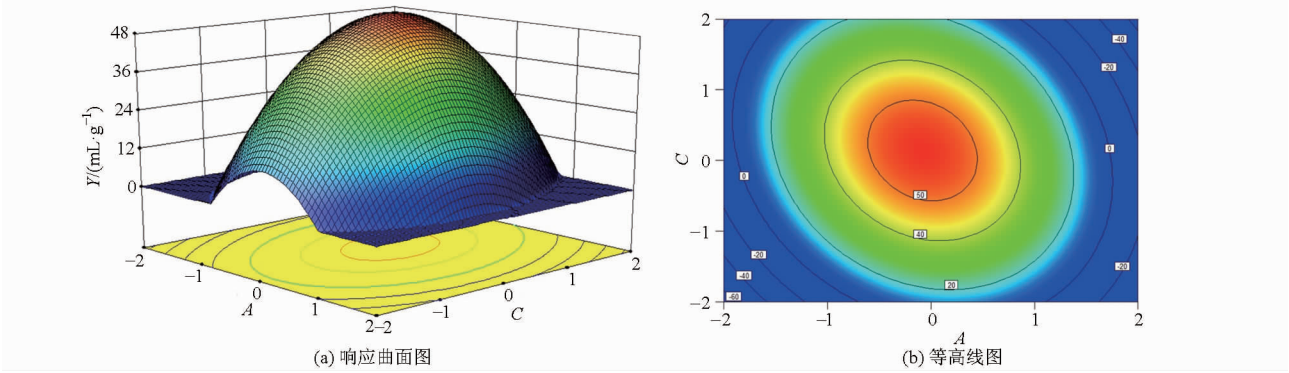


图 4 物料质量分数-接种物质量分数交互因素效应图

Fig. 4 Response surface chart and contour chart of substrate concentration and inoculum concentration

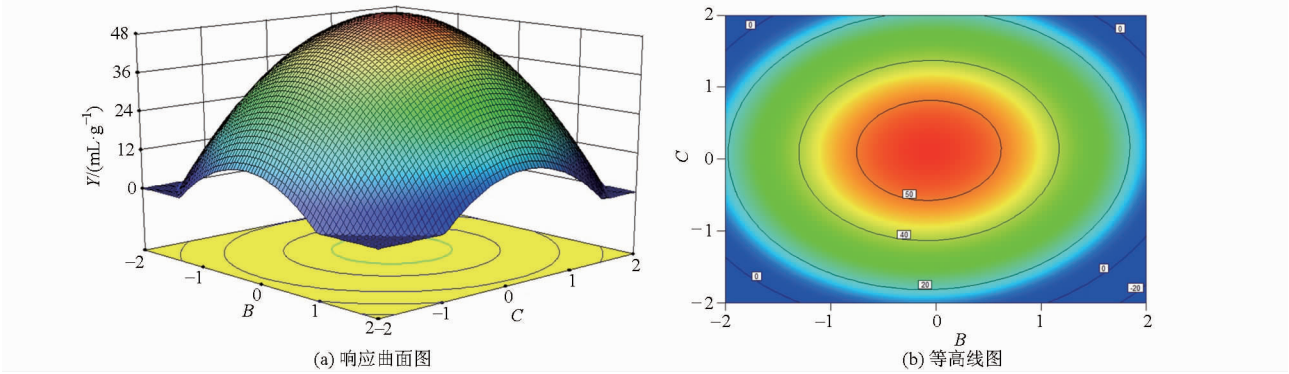


图 5 接种物质量分数-碳氮比交互因素效应图

Fig. 5 Response surface chart and contour chart of inoculum concentration and C/N ratio

物质质量分数在 16.56% ~ 25.03% 之间,TS 产气率也在 50 mL/g 以上。从等高线图 5b 中可知,B、C 的交互作用对 TS 产气率的影响较小,但 B、C 分别在 -0.75 ~ 0.63 和 -0.58 ~ 0.82 之间仍可使 TS 产气率达到一较高水平,即需要碳氮比和接种物质量分数控制在 14.98 ~ 22.35 和 16.56% ~ 24.85% 之间。

2.5 参数寻优

使用 Design-Expert 数据分析软件,对图 3 ~ 5 的响应曲面进行分析,得出当马铃薯茎叶和玉米秸秆混合厌氧消化 TS 产气率达到最高值时,A、B、C 分别为 -0.075、-0.050、0.137,根据编码值与实际值的转换获得马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化的

最优工艺参数:物料质量分数为 9.78%、碳氮比为 18.73、接种物质量分数为 20.82%,预测 TS 产气率为 54.55 mL/g。与表 3 相比,预测 TS 产气率略低于个别实测值,原因是本研究并未涉及温度变化对 TS 产气率带来的影响,而是在水浴恒定 35℃ 条件下进行厌氧消化,由于试验期间正值盛夏,环境温度偶尔已超过设定的温度,故使试验结果产生了一点偏差,但通过下面的模型验证分析可得知这并不影响本研究结果的准确性。

2.6 验证分析

为验证模型的准确性,选取最佳工艺条件试验组并随机选取 5 个不同于表 3 中的试验组,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水平编码如表 5 所示。

表 5 模型验证试验组水平编码

Tab.5 Levels of experimental factors for model test			
试验序号	A	B	C
1	-0.075	-0.050	0.137
2	1	0	1.682
3	-1	1.682	0
4	0	1	1.682
5	0	1.682	1
6	-1.682	0	1

在上述条件下进行马铃薯茎叶与玉米秸秆的混合厌氧消化 TS 产气率验证试验,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 6 所示。

表 6 模型预测值与试验值方差分析

Tab.6 Variance analysis of model predictions and experimental value				
试验序号	试验值/ (mL·g ⁻¹)	预测值/ (mL·g ⁻¹)	相对误差/ %	F
1	54.47	54.55	0.1	0.120
2	5.53	5.66	2.3	0.203
3	16.41	16.38	0.2	0.017
4	21.82	21.99	0.8	0.347
5	19.07	19.13	0.3	0.043
6	10.89	10.92	0.3	0.011

由表 6 可知,验证试验组 TS 产气率与回归模型预测值之间相对误差均小于 5%,且方差检验结果

均为 $F < F_{0.01}(2,3) = 30.82$,说明模型预测值与验证试验值之间没有显著性差异,即 TS 产气率与各因素之间得到的回归模型拟合较好,得到的 TS 产气率模型可靠性较高。

3 结论

(1)通过设计三因素五水平二次回归正交旋转组合试验,得出了以马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化 TS 产气率为响应值的二次回归模型,对各项回归系数进行显著性检验,其相关系数 R 为 $0.9804 > R_{0.01} = 0.836$, $P < 0.01$,表明该回归模型拟合效果较优。物料质量分数、碳氮比和接种物质量分数 3 个因素与 TS 产气率均呈现显著相关性。3 个因素对马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化的影响由大到小依次为接种物质量分数、碳氮比与物料质量分数。接种物质量分数与物料质量分数、物料质量分数与碳氮比、碳氮比与接种物质量分数两两因素间的交互作用均对 TS 产气率影响显著。

(2)马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化的最优工艺条件为:物料质量分数为 9.87%、碳氮比为 18.73、接种物质量分数为 20.82%,预测 TS 产气率为 54.55 mL/g。

(3)在最佳马铃薯茎叶与玉米秸秆混合厌氧消化工艺条件下,通过 6 组验证试验,对结果分析得出,6 组试验的 TS 产气率试验值与模型预测值之间的相对误差均小于 5%,且 F 值均小于 $F_{0.01}$,方差分析不显著,表明该回归模型拟合较好。

参 考 文 献

1 FAO. FAOSTAT[EB/OL]. [2016-02-03]. <http://faostat3.fao.org/>.

2 安志刚,韩黎明,刘玲玲,等. 马铃薯废弃物的资源化利用[J]. 食品与发酵工业,2015,41(2):265-270.

3 赵雪淞,李盛钰,何大俊,等. 马铃薯糖苷生物碱抗真菌活性构效关系研究[J]. 食品工业科技,2013,34(6):159-163. ZHAO Xuesong, LI Shengyu, HE Dajun, et al. Structure-antifungal activity relationships of potato glycoalkaloids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(6):159-163. (in Chinese)

4 NIKOLIC N C, STANKOVIC M Z. Hydrolysis of glycoalkaloids from *Solanum tuberosum* L. haulm by enzymes present in plant material and by enzyme preparation[J]. Potato Research, 2005, 48(12):25-33.

5 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2016-02-03]. <http://data.stats.gov.cn/index.htm>.

6 吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报,2009,40(1):91-99. WU Chuangzhi, ZHOU Zhaoqiu, YIN Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):91-99. (in Chinese)

7 张妍,邓舟,夏洲,等. 农村生物质废物厌氧消化技术研究现状及展望[J]. 环境卫生工程,2009,17(5):1-3. ZHANG Yan, DENG Zhou, XIA Zhou, et al. Research status and prospect on anaerobic digestion technology of rural biomass waste[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2009,17(5):1-3. (in Chinese)

8 庞凤梅,李玉浸,杨殿林,等. 农作物秸秆沼气发酵与直接利用效益比较[J]. 中国沼气,2008,26(2):34-37. PANG Fengmei, LI Yujin, YANG Dianlin, et al. Crop straw biogas fermentation compared with direct use efficiency[J]. China Biogas, 2008,26(2):34-37. (in Chinese)

9 李山云,孙玲,卢丽丽,等. 多态性信息含量法评价马铃薯品种(系)营养成分[J]. 西南农业学报,2015,28(2):519-526. LI Yunshan, SUN Ling, LU Lili, et al. Polymorphism information content method to evaluate nutrients of potato varieties (lines) [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015,28(2):519-526. (in Chinese)

10 张秋燕,张福平. 马铃薯品种的营养成分分析[J]. 中国食物与营养,2010(6):75-77.

ZHANG Qiuyan, ZHANG Fuping. Determination of nutritional components in different potato varieties[J]. Food and Nutrition in China, 2010(6):75 – 77. (in Chinese)

11 董晓宇, 孙守如, 杨秋生, 等. 碳氮比和氮源配比对玉米秸基质发酵效果的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008,42(2): 167 – 179.
DONG Xiaoyu, SUN Shouru, YANG Qiusheng, et al. Effect of carbon-to-nitrogen ratios and nitrogen resources on the corn stalk fermentation for substrate production[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008,42(2):167 – 179. (in Chinese)

12 LUO Q M, LI X J, ZHU B N, et al. Anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2):111 – 115.

13 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):211 – 217.
BI Yuyun, GAO Chunyu, WANG Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):211 – 217. (in Chinese)

14 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12):291 – 296.
CUI Ming, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12):291 – 296. (in Chinese)

15 潘君廷, 邱凌, A. A. M. Hassanein, 等. 生物炭添加对鸡粪厌氧消化产气特性的影响[J]. 农业机械学报, 2014,45(12): 229 – 233.
PAN Junting, QIU Ling, A. A. M. HASSANEIN, et al. Orthogonal experiment on biogas production characteristics of chicken manure with biochar [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):229 – 233. (in Chinese)

16 李东, 叶景清, 孙永明, 等. 稻草与牛粪混合连续厌氧消化制备生物燃气研究[J]. 农业机械学报, 2013,44(1):101 – 105.
LI Dong, YE Jingqing, SUN Yongming, et al. Continuous anaerobic co-digestion of rice straw and cow manure for biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):101 – 105. (in Chinese)

17 袁志发, 周静芊. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2000: 346 – 387.

18 赵凤敏, 李树君, 方宪法, 等. 中心组合设计法优化马铃薯薯渣固态发酵工艺[J]. 农业机械学报, 2006,37(8):45 – 48.
ZHAO Fengmin, LI Shujun, FANG Xianfa, et al. Optimization of potato residues solid substrate fermentation technology using central composite design [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8):45 – 48. (in Chinese)

19 DRAPER N, JOHN J A. Response-surfaces designs for quantitative and qualitative variables[J]. Technometrics, 1988,30(4): 423 – 428.

20 WANG G, MU Y, YU H Q. Response surface analysis to evaluate the influence of pH, temperature and substrate concentration on the acidogenesis of sucrose-rich wastewater[J]. Biochemical Engineering Journal, 2005,23(2):175 – 184.

21 李艳宾, 张琴, 李为, 等. 接种量及物料配比对棉秆沼气发酵的影响[J]. 西北农业学报, 2011,20(1):194 – 199.
LI Yanbin, ZHANG Qin, LI Wei, et al. Effects of inoculation quantity and material proportion on biogas fermentation of cotton stalk[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011,20(1):194 – 199. (in Chinese)

22 刘丹, 李文哲, 刘爽, 等. 有机成分比例对餐厨废弃物厌氧发酵特性的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5):166 – 172.
LIU Dan, LI Wenzhe, LIU Shuang, et al. Influence of organic ingredients mixing ratio on anaerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 166 – 172. (in Chinese)

23 荆艳艳, 岳建芝, 王毅, 等. 超微玉米秸秆光合产氢响应面法优化研究[J]. 太阳能学报, 2014,35(1):14 – 18.
JING Yanyan, YUE Jianzhi, WANG Yi, et al. The optimization on ultramicro cornstalk photosynthetic bacteria hydrogen production by response surface methodology[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014,35(1):14 – 18. (in Chinese)

24 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.

(上接第 118 页)

13 刘培斌. 暗管排水稻田中氮素淋失动态混合模型及应用[J]. 中国环境科学,2000,20(1):13 – 17.
LIU Peibin. Application of nitrogen leaching losses mixed simulative model in tile effluent from the drained paddy rice field [J]. China Environment Science, 2000,20(1):13 – 17. (in Chinese)

14 CHRISTIANE L G. Effect of envelopes on flow pattern near drain pipe[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1989, 115(4):626 – 641.

15 KABOOSI K, LIAGHAT A, HOOSSEINI S H. The feasibility of rice husk application as envelope material in subsurface drainage systems[J]. Irrigation and Drainage,2012,61:490 – 496.

16 VAN GENUCHTEN M TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892 – 898.

17 CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research,1988,24(5):755 – 769.

18 瞿兴业. 农田排灌渗流计算及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.