

生物炭介导的鸡粪厌氧消化产甲烷工艺参数优化

潘君廷¹ 邱凌^{1,2} 郭晓慧^{1,2} 马俊怡¹ 郜天磊²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业部农村可再生能源开发利用西部实验站, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探究生物炭介导的鸡粪厌氧消化产甲烷最优工艺参数,在前期试验的基础上,以鸡粪添加量、生物炭添加量和碳氮比为参数,在(35±1)℃条件下进行了生物炭介导的鸡粪序批式三因素二次旋转组合厌氧消化试验。以单位挥发性固体(VS)累积产甲烷量为评价指标,通过响应面法获得单位VS累积产甲烷量随三因素变化的二次回归模型。结果表明:回归模型拟合性较好,能较好描述单位VS累积产甲烷量随鸡粪添加量、生物炭添加量和碳氮比变化的规律。通过对模型工艺参数寻优,得到最优工艺参数为鸡粪添加量14.35 g、生物炭添加量4.97%、碳氮比22.02,此条件下单位VS产甲烷量为283 mL/g,为生物炭介导的鸡粪厌氧消化工程应用提供了参考依据。

关键词: 鸡粪; 厌氧消化; 生物炭; 累积产甲烷; 参数优化

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0167-07

Optimizing Process Parameters for Methane Production during Biochar-mediated Anaerobic Digestion of Poultry Manure

Pan Juntong¹ Qiu Ling^{1,2} Guo Xiaohui^{1,2} Ma Junyi¹ Gao Tianlei²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Northwest Research Center of Rural Renewable Energy Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The quadratic orthogonal rotation regression combination design was employed in this study to determine effects of poultry manure amount, biochar dosage and C/N ratio on biochar-mediated mesophilic anaerobic digestion of poultry manure. These three factors were then subjected to response surface methodology to obtain optimum parameters for methane production. The results showed that specific cumulative methane production (SCMP) could be obviously increased by adding appropriate amount of biochar during anaerobic digestion of poultry manure. SCMP was increased as biochar dosage increased from 2.5% to 5.0%, but was significantly decreased with the further increase of biochar dosage up to 7.5% ($P < 0.05$). Lower poultry manure amount could result in higher SCMP. The effect of C/N ratio on SCMP showed the same trend with biochar dosage, namely an initial increase up to certain level and followed by decreasing change. The highest SCMP (288 mL/g) was observed with biochar dosage of 5.0%, poultry manure amount of 17.83 g and C/N ratio of 25. The developed mathematical regression model here showed a good fit with the experimental data. Moreover, the model predicted that the maximum SCMP could be obtained with biochar dosage of 4.97%, poultry manure amount of 14.35 g and C/N ratio of 22.02.

Key words: poultry manure; anaerobic digestion; biochar; cumulative methane production; parameters optimization

收稿日期: 2015-11-17 修回日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51576167)

作者简介: 潘君廷(1989—),男,博士生,主要从事生物质能研究,E-mail: panjunting@vip.qq.com

通信作者: 邱凌(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事生物质能和生态农业研究,E-mail: QL2871@126.com

引言

厌氧消化过程中,由物料理化特性和微生物代谢需求间失配而造成的中间代谢产物积累,进而导致微生物生命活动受到抑制是厌氧消化稳定性差的主要原因^[1-3]。由于鸡粪含有较多的尿酸和未消化的蛋白质,因而在厌氧消化过程中会产生大量氨氮,进而导致微生物的生命活动受到抑制形成氨抑制现象^[4-5]。为了缓解高氮原料厌氧消化氨抑制,目前主要是通过调配厌氧消化基质和驯化厌氧消化微生物适应高氨氮浓度来实现。厌氧消化基质调配主要包括将鸡粪稀释至总固体(TS)质量分数为0.5%~3%^[6],与果蔬废弃物^[7]、秸秆^[8]、谷类食物垃圾^[9]等进行混合厌氧消化。通过驯化使接种物适应高氨氮浓度并向厌氧消化料液中添加5~10 g/L的沸石,使鸡粪厌氧消化产甲烷率提高43.4%^[10]。鸡粪稀释会增大厌氧消化反应器容积,降低容积产气率 and 经济效益。鸡粪与其他原料配比进行多原料混合厌氧消化时,由于物料到达产气高峰时间不一致会导致厌氧消化过程较难控制。接种物的驯化耗时较长且在连续式厌氧消化过程中容易排出而需要持续驯化添加。由此,利用生物亲和性材料介导厌氧消化过程,实现高氮原料厌氧消化系统氨氮的局域缓释,通过加强微生物厌氧呼吸作用进而强化微生物适应氨氮能力具有重要意义。

生物炭是由生物质在完全或部分缺氧情况下经低温热解炭化产生的高度芳香化难熔性固态物质^[11]。生物炭可为微生物提供部分磷及无机矿物元素,具有良好的生物亲和性^[12-13]。生物炭具有较大的孔隙度和比表面积,可以实现重金属阻控^[14]和有机污染物的去除^[15],因而添加生物炭的鸡粪厌氧消化后直接施入农田具有良好的环境效应。DAS等^[16]研究表明,生物炭添加能促进牛粪、鸡粪和藻类厌氧消化的产气量。MUMME等^[17]研究表明,生物炭添加可以缓解氨氮对厌氧消化的轻度抑制。LUO等^[18]以葡萄糖为底物进行序批式厌氧消化发现:生物炭能缩短水力滞留期,提高产气速率,为微生物提供附着载体并影响微生物种群的结构空间和时间分布。CHEN等^[19]以乙醇为底物对纯培养的微生物进行研究发现:生物炭能促进厌氧微生物的共生代谢效率。因此,生物炭可作为良好的生物亲和性材料介导鸡粪厌氧消化过程,可以提高鸡粪厌氧消化系统稳定性,缓解氨抑制。为此,本文对前期已获得的较佳生物炭添加参数^[20]进行优化,并考察生物炭添加量、鸡粪添加量和碳氮比对鸡粪厌氧消化产甲烷特性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜鸡粪取自杨凌示范区某养鸡场(34.312°N, 108.059°E;笼式养鸡),鸡粪由鸡笼下直接获取,手工剔除鸡毛和大的杂物并用自封袋密封后放置于4℃冰箱中冷藏备用。生物炭购自陕西省亿鑫生物能源科技开发有限公司(34.313°N, 108.003°E)以果园废弃果木在550℃厌氧条件下制备的木质生物炭,粉碎后取粒径0.3~0.45 mm颗粒备用。接种物取自鸡粪单独序批式厌氧消化剩余物(保存于35℃条件下)。试验原料的固体(TS)含量,挥发性固体(VS)含量及碳氮比如表1所示。

表 1 试验原料的特性
Tab.1 Characteristics of raw materials

原料特性	TS 质量 分数/%	VS 质量 分数/%	VS 与 TS 质量比/%	碳氮 比
接种物	4.44 ± 0.10	2.53 ± 0.07	57.09 ± 0.35	
鸡粪	21.29 ± 1.70	15.14 ± 1.92	70.94 ± 3.51	8.08
微晶纤维素	98.06 ± 0.01	97.92 ± 0.02	99.86 ± 0.03	
生物炭(40目)	96.09 ± 0.03	83.05 ± 0.06	86.43 ± 0.06	

1.2 试验设计

试验在已得出的较佳生物炭添加参数^[20]基础上,以生物炭添加量(占鸡粪干物质量的百分比)、鸡粪添加量(挥发性固体添加量,下同)和碳氮比(总有机碳与总凯氏氮之比)为试验参数,采用三因素二次回归正交旋转组合设计试验,以VS产甲烷量为评价指标,通过响应面法获得生物炭介导鸡粪厌氧消化产甲烷的最佳参数。试验设计通过Design-Expert 8.0.6(Stat-Ease,美国)完成,试验设计如表2所示,碳氮比通过微晶纤维素调节。

1.3 试验建立

试验采用玻璃注射器集气法,试验装置如图1所示。按照试验设计,向500 mL(有效容积400 mL)厌氧消化反应器(图1)中装料后,加入接种物100 mL并加水至400 mL混合均匀,向厌氧消化瓶中吹入70%氮气和30%的二氧化碳混合气体5 min以排出厌氧消化反应器中的空气,厌氧反应器通过丁基塞密封后与外界空气隔绝,保证厌氧消化反应器中绝对的厌氧环境。厌氧消化反应器中料液厌氧消化所产生的气体在气压的作用下经由插在丁基塞上的针头通过塑料细软管进入到玻璃注射器中。血清瓶和玻璃注射器通过塑料细软管上安装的阀门,实现管道的导通和关闭。排入注射器中的气体注入集气袋中收集保存并用于气体成分测试分析。每组试验设4个平行(3个用于测量产气,1个用于料液

表 2 试验设计
Tab.2 Design of experiment

组别	鸡粪添加量 /g	生物炭添加量 /%	碳氮比
G1	17.83(0)	5.00(0)	25(0)
G2	17.83(0)	5.00(0)	35(1.68)
G3	17.83(0)	5.00(0)	15(-1.68)
G4	21.05(1.00)	3.51(-1.00)	31(1.00)
G5	14.61(-1.00)	6.49(1.00)	31(1.00)
G6	17.83(0)	5.00(0)	25(0)
G7	14.61(-1.00)	3.51(-1.00)	31(1.00)
G8	14.61(-1.00)	6.49(1.00)	19(-1.00)
G9	17.83(0)	5.00(0)	25(0)
G10	17.83(0)	5.00(0)	25(0)
G11	21.05(1.00)	3.51(-1.00)	19(-1.00)
G12	17.83(0)	7.50(1.68)	25(0)
G13	17.83(0)	2.50(-1.68)	25(0)
G14	21.05(1.00)	6.49(1.00)	31(1.00)
G15	21.05(1.00)	6.49(1.00)	19(-1.00)
G16	23.24(1.68)	5.00(0)	25(0)
G17	14.61(-1.00)	3.51(-1.00)	19(-1.00)
G18	17.83(0)	5.00(0)	25(0)
G19	11.40(-1.68)	5.00(0)	25(0)
G20	17.83(0)	5.00(0)	25(0)

注:括号内为因素水平。

特性分析),以测量产气的 3 个平行试验产甲烷的平均值作为日产甲烷量。所有试验组放置在可设定温度的往复式恒温振荡水浴摇床 (SPH-110X24 型,上海世平实验设备有限公司,中国)中进行序批式中温((35±1)℃)厌氧消化至产气结束。每天 09:00 和 16:00 各打开水浴摇床的振荡功能,振速为 100 r/min,振荡 10 min,确保厌氧消化料液混合均匀,每 3 天分析一次气体成分。

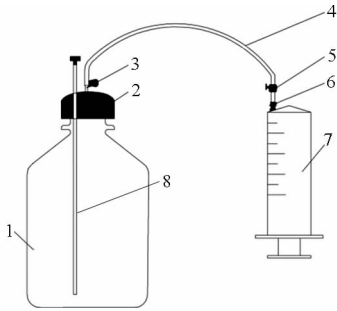


图 1 厌氧消化装置 (500 mL)

Fig.1 Anaerobic digestion device (500 mL)

1. 厌氧消化反应器 2. 丁基塞 3. 针头 4. 塑料软管 5. 阀门
6. 接口 7. 玻璃注射器 8. 取样管

1.4 分析方法

TS 和 VS 的测量根据标准方法^[21];通过玻璃注射器排开的体积确定日产气量。总凯氏氮 (TKN) 含量采用凯氏定氮法用全自动凯氏定氮仪 (UDK159 型,VELP Scientifica,意大利)测定,总有

机碳 (TOC) 含量采用燃烧法通过 TOC 分析仪 (YLJS2013-01 型,岛津公司,日本)测定,碳氮比为 TOC 与 TKN 之比。甲烷含量采用气相色谱仪 (GC2014C 型,岛津公司,日本)测定,TCD 检测器,入口温度 100℃,检测器温度 100℃,炉温 90℃载气为氩气,流速为 30 mL/min。绘图采用 Origin 8.0 (OriginLab 公司,美国),数据分析用 SPSS (SPSS 公司,美国)和 Design-Expert 8.0.6 共同完成。

2 结果分析

2.1 生物炭添加量对鸡粪厌氧消化累积产甲烷量的影响

相同鸡粪添加量和碳氮比,不同生物炭添加量处理组的单位 VS 累积产甲烷量如图 2 所示。由图 2a、2b 可以看出,鸡粪添加量为 14.61 g(-1.00 水平)及碳氮比为 19(-1.00 水平)和 31(1.00 水平)时,生物炭添加量对单位 VS 累积产甲烷量影响均不明显。这可能是由于本试验接种物取自鸡粪序批式厌氧消化剩余物,接种物内的微生物群落结构已对低浓度鸡粪厌氧消化料液较为适应^[22],因而鸡粪添加量为 14.61 g 时,生物炭对单位 VS 累积产甲烷量影响不明显。如图 2c 所示,鸡粪添加量为 17.83 g(0 水平)及碳氮比为 25(0 水平)时,生物炭添加量为 5%(0 水平)试验组 G1、G6、G9、G10 和 G20 单位 VS 累积产甲烷量分别为 260、288、276、285、284 mL/g,均高于生物炭添加量为 7.5%(1.68 水平)的试验组 G12(195 mL/g)和 2.5%(-1.68 水平)的试验组 G13(243 mL/g);生物炭添加量为 5%的试验组单位 VS 累积产甲烷量显著高于生物炭添加量为 7.5%的试验组 ($P < 0.05$),但与 2.5%(-1.68 水平)的试验组相比并未达到显著水平 ($P > 0.05$)。这与 DAS 等^[16]发现生物炭添加量为 5%时鸡粪厌氧消化产甲烷量最高,但与生物炭添加量 2.5%时鸡粪厌氧消化产甲烷量差异不显著的研究结论一致。由图 2d、2e 所示,鸡粪添加量为 21.05 g(1.00 水平)及碳氮比为 19(-1.00 水平)、31(1.00 水平)时,生物炭添加量为 6.49%(1.00 水平)的试验组 G15 和 G14 单位 VS 累积产甲烷量分别为 254、267 mL/g,均高于生物炭添加量为 3.51%(-1.00 水平)的试验组 G11 和 G4 的单位 VS 累积产甲烷量 204、231 mL/g,且当碳氮比为 19 时,G15 与 G11 单位 VS 累积产甲烷量差异显著 ($P < 0.05$)。这可能是由于在鸡粪及生物炭添加量较多条件下,生物炭介导在一定程度上加强了某些厌氧微生物的共代谢效率^[19],增强某些难降解有机物的降解效率^[23],进而提升了单位 VS 累积产甲烷量。

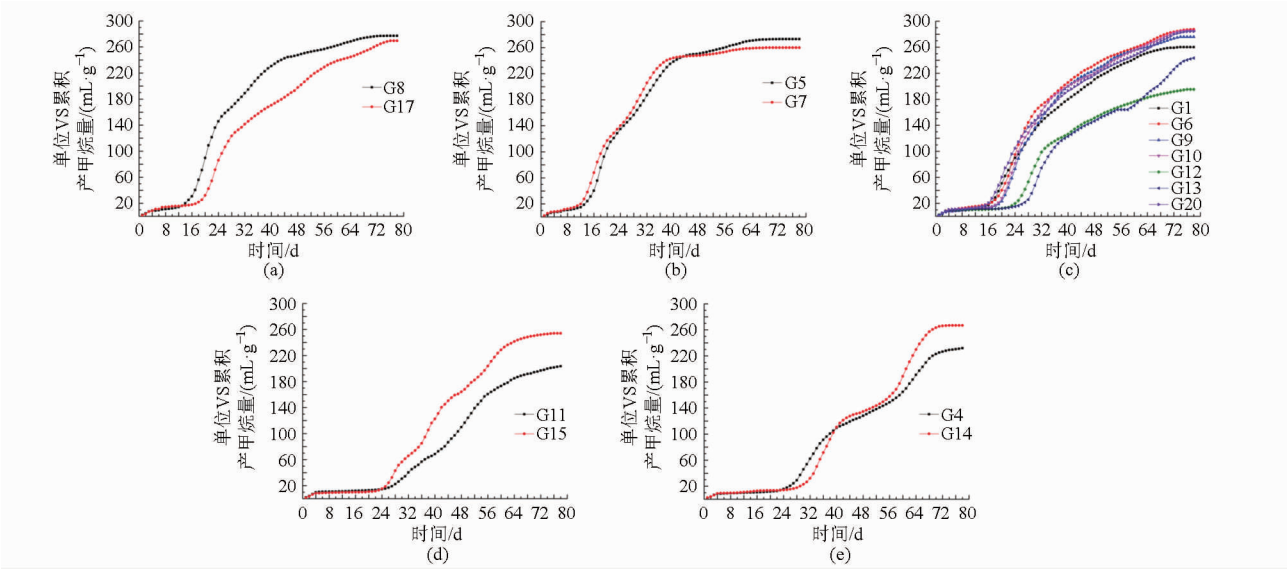


图 2 不同生物炭添加量试验组单位 VS 累积产甲烷量曲线

Fig. 2 Cumulative methane per VS of different amounts of biochar addition

2.2 鸡粪添加量对生物炭介导的鸡粪厌氧消化累积产甲烷量的影响

有机负荷会影响厌氧消化料液的可溶性有机碳、pH 值和挥发性脂肪酸并进一步影响其产甲烷特性^[24]。试验中,有机负荷主要与鸡粪添加量有关。图 3 为相同生物炭添加量和碳氮比,不同鸡粪添加量下鸡粪厌氧消化单位 VS 累积产甲烷情况。生物炭添加量为 3.51% (- 1.00 水平),碳氮比分别为 19 (- 1.00 水平)和 31(1.00 水平)时,鸡粪添加量为 14.61 g (- 1.00 水平)的试验组 G17 和 G7 单位 VS 累积产甲烷量分别为 270、260 mL/g,均分别优于鸡粪添加量为 21.05 g(1.00 水平)的试验组 G11 (204 mL/g)和试验组 G4(232 mL/g),且 G17 和 G11 差异呈显著水平(图 3a、3b)。由图 3a、3b 还可以看出,鸡粪添加量为 14.61 g 时,生物炭介导鸡粪厌氧

消化产甲烷速率高于鸡粪添加量为 21.05 g 试验组。由图 3c 可以看出,当生物炭添加量为 5% (0 水平),碳氮比为 25(0 水平)时,鸡粪添加量为 23.24 g (1.68 水平)的 G16 试验组单位 VS 累积产甲烷量最低,为 222 mL/g;鸡粪添加量为 11.40 g (- 1.68 水平)的 G19 试验组单位累积产甲烷速率最快,单位 VS 累积产甲烷量为 264 mL/g,与鸡粪添加量为 17.83 g(0 水平)的 G1、G6、G9、G10 和 G20 单位 VS 累积产甲烷量 260、288、276、285 mL/g 相比,差异不大。生物炭添加量为 6.49% (1.00 水平),碳氮比为 19 和 31 条件下,鸡粪添加量为 14.61 g 的 G8 和 G5 试验组单位 VS 累积产甲烷量分别为 277、273 mL/g,均高于鸡粪添加量为 21.05 g 的 G15(254 mL/g)和 G14(267 mL/g)试验组。由此可见,当生物炭添加量和碳氮比相同时,鸡粪添加量

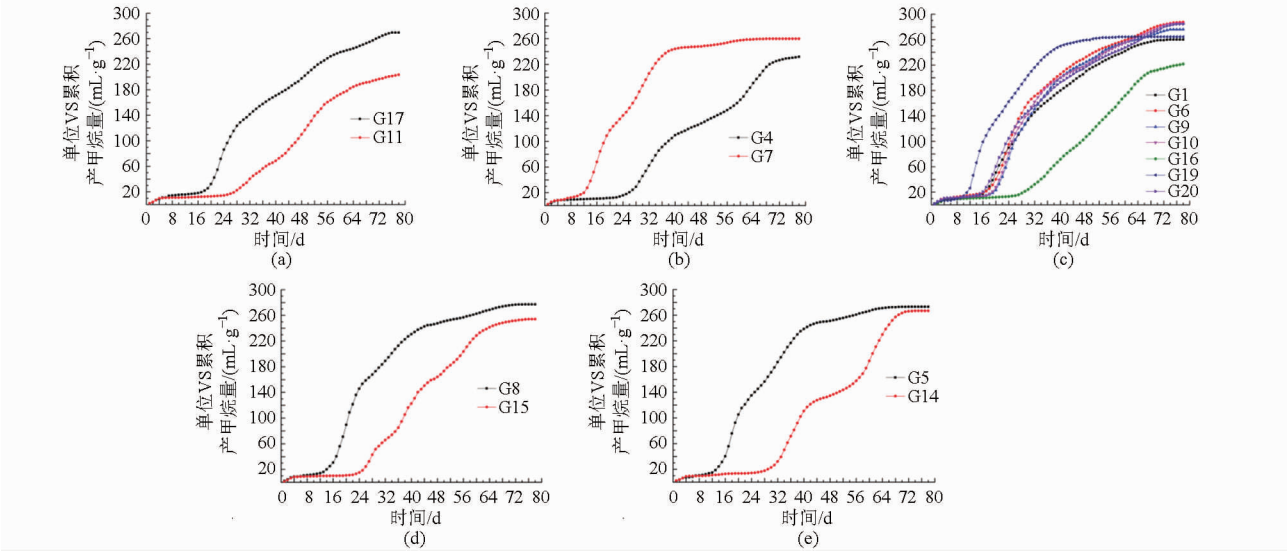


图 3 不同鸡粪添加量试验组单位 VS 累积产甲烷量曲线

Fig. 3 Cumulative methane per VS of different poultry manure amounts

较少试验组的单位 VS 累积产甲烷量优于鸡粪添加量较多的试验组。印证了 BUJOCZEK 等^[6]得到的鸡粪厌氧消化料液中较低的总固体浓度有利于提升鸡粪厌氧消化单位 VS 累积产甲烷量的研究结论。

2.3 碳氮比对生物炭介导的鸡粪厌氧消化累积产甲烷量的影响

碳氮比是厌氧消化的重要指标之一,碳氮比 20~30 时为对厌氧消化最有利的碳氮比范围^[25-26]。相同鸡粪和生物炭添加量,不同碳氮比单位 VS 累积产甲烷量如图 4 所示。当鸡粪添加量为 14.61 g (-1.00 水平),生物炭添加量为 3.51% (-1.00 水平)时,碳氮比分别为 31(1.00 水平)和 19(-1.00 水平)的 G7 和 G17 试验组单位 VS 累积产甲烷量分别为 260、270 mL/g,二者之间无显著差异,但 G7 试验组产气速率优于 G17 试验组(图 4a);当鸡粪添加量为 14.61 g,生物炭添加量为 6.49%(1.00 水平)时,碳氮比为 31 的 G5 试验组单位产气量为 273 mL/g,与碳氮比为 19 的 G8 试验组单位 VS 累积产甲烷量(277 mL/g)基本相同且产气

速率也趋于一致(图 4b)。碳氮比为 31 和 19 均接近于厌氧消化最有利的碳氮比范围^[25-26],因此 G7 和 G17 试验组的单位 VS 累积产甲烷量无明显差别。由图 4c 可以看出,鸡粪添加量为 17.83 g(0 水平),生物炭添加量为 5%(0 水平)和碳氮比为 25(0 水平)时的 G1、G6、G9、G10 和 G20 的单位 VS 累积产甲烷量分别为 260、288、276、285、284 mL/g,均高于碳氮比为 35(1.68 水平)的 G2(242 mL/g)和碳氮比为 15(-1.68 水平)的 G3 试验组(247 mL/g),但未达显著水平($P>0.05$)。这支持了 WANG 等^[8]得到的过高和过低的碳氮比均不利于厌氧消化的研究结论。当鸡粪添加量为 21.05 g(1.00 水平)时,生物炭添加量为 3.51%(-1.00 水平),碳氮比分别为 19 的 G4 试验组和 31 的 G11 试验组单位 VS 累积产甲烷量均接近,分别为 232、204 mL/g(图 4d);生物炭添加量为 6.49%(1.00 水平),碳氮比分别为 19 和 31 时也得到了类似的试验结果, G15 和 G14 试验组的单位 VS 累积产甲烷量分别为 254、267 mL/g(图 4e)。

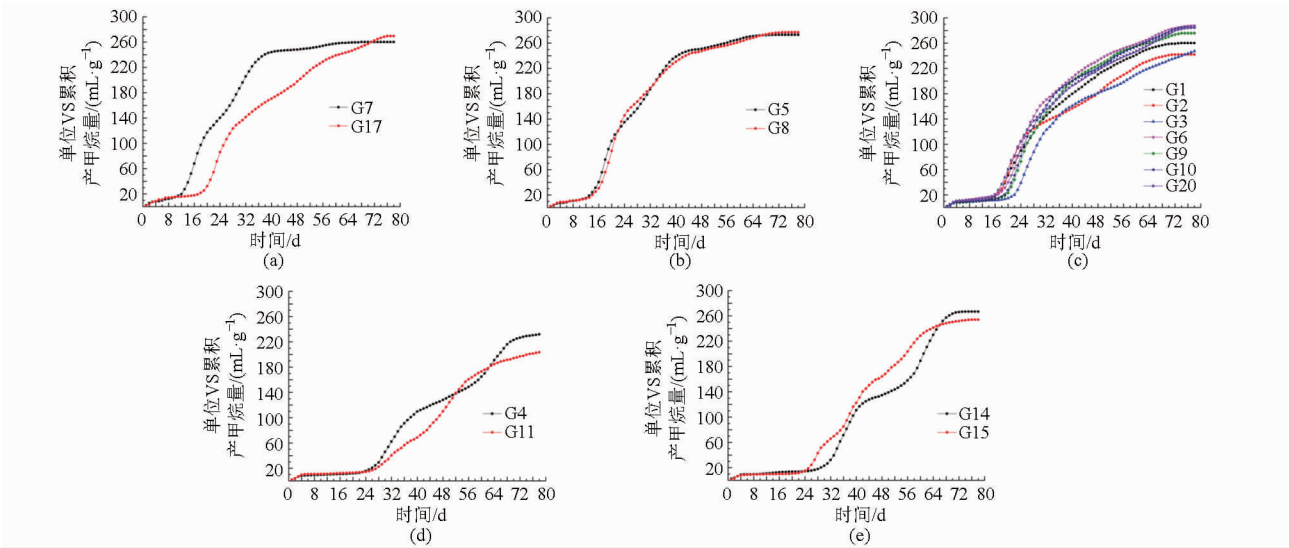


图 4 不同碳氮比试验组单位 VS 累积产甲烷量
Fig.4 Cumulative methane per VS of different C/N ratios

2.4 生物炭介导的鸡粪厌氧消化累积产甲烷参数优化

各试验组单位 VS 累积产甲烷量实测值及预测值如表 3 所示,通过对各实测值进行回归分析可获得以鸡粪添加量、生物炭添加量和碳氮比编码水平为因子的单位 VS 累积产甲烷量的回归模型为

$$Y = 273.63 - 14.34A - 5.56B + 1.35C - 4.54AB + 6.83AC + 11.37BC - 6.60A^2 - 14.98B^2 - 5.99C^2$$

其中 Y 为单位 VS 累积产甲烷量, A 为鸡粪添加量编码值, B 为生物炭添加量编码值, C 为碳氮比编码值。模型的 F 值为 2.33,说明有 10.22% 的可能性

模型 F 值是由模型噪声引起。模型失拟 F 值为 2.91,模型失拟水平不显著,说明该模型与单位 VS 累积产甲烷量实际值拟合效果较好。由表 3 预测值和实测值对比也可看出模型拟合效果较好。本模型信噪比为 5.35(大于 4.0),说明模型可靠。综上,该回归拟合效果较好。

对鸡粪添加量、生物炭添加量和碳氮比三因素两两分析可得因素之间相互作用的响应面图和等高线图,如图 5 所示。由图 5a 可以看出,当生物炭和鸡粪添加量同时减少时,单位 VS 累积产甲烷量降低较快。由图 5b 可以看出,当生物炭添加量保持在

表 3 试验实测值与预测值

Tab. 3 Predicted and actual value of experiment

mL/g		
组别	预测值	实测值
G1	274	260
G2	259	242
G3	254	247
G4	239	232
G5	265	273
G6	274	288
G7	245	260
G8	253	277
G9	274	276
G10	274	285
G11	245	254
G12	222	195
G13	241	243
G14	241	267
G15	202	204
G16	231	222
G17	278	270
G18	274	253
G19	279	264
G20	274	284

-0.03 水平时,鸡粪添加量由 -2.23 水平变化到 0.77 水平时单位 VS 累积产甲烷量变化不大。由二阶多项式及响应面图可以计算出,鸡粪添加量为 -1.08 水平、生物炭添加量为 -0.02 水平和碳氮比为 -0.5 水平时生物炭介导的鸡粪单位 VS 累积产甲烷量最高。由此,生物炭介导的鸡粪序批式厌氧消化最佳参数为:鸡粪添加量为 14.35 g,生物炭添加量为 4.97% 和碳氮比为 22.02。此条件下,单位 VS 累积产甲烷量为 283 mL/g。

3 结论

(1)生物炭添加量由 2.5% 增加到 7.5% 时,厌氧消化单位 VS 累积产甲烷量先增加后降低。生物

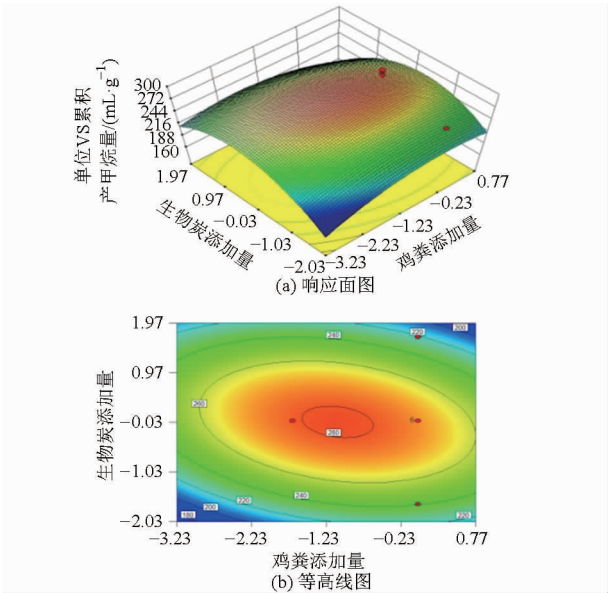


图 5 单位 VS 累积产甲烷量的响应面和等高线图

Fig. 5 Response surface and contour plots for cumulative methane per VS

炭添加量为 5% 时单位 VS 累积产甲烷量显著高于添加量为 7.5% 的试验组 ($P < 0.05$),但与添加量为 2.5% 的试验组相比,未达显著水平 ($P > 0.05$)。

(2)生物炭介导下,鸡粪添加量较少的厌氧消化试验组单位 VS 累积产甲烷量优于鸡粪添加量较多的试验组。添加量为 17.83 g 时,单位 VS 累积产甲烷量最高。

(3)以鸡粪添加量、生物炭添加量和碳氮比为因子的回归模型对生物炭介导的鸡粪厌氧消化单位 VS 累积产甲烷量拟合度较好,能较好描述累积产甲烷量随鸡粪添加量、生物炭添加量和碳氮比变化的规律。

(4)通过对模型工艺参数寻优,得到最优工艺参数为鸡粪添加量 14.35 g、生物炭添加量 4.97%、碳氮比 22.02,为生物炭介导的鸡粪序批式厌氧消化工程应用提供了相应参考依据。

参 考 文 献

1 LÜ F, HAO L, GUAN D, et al. Synergetic stress of acids and ammonium on the shift in the methanogenic pathways during thermophilic anaerobic digestion of organics[J]. Water Research, 2013, 47(7): 2297 – 2306.

2 PALATSI J, VÍÑAS M, GUIVERNAU M, et al. Anaerobic digestion of slaughterhouse waste: main process limitations and microbial community interactions[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2219 – 2227.

3 YENIGÜN O, DEMIREL B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a review[J]. Process Biochemistry, 2013, 48(5): 901 – 911.

4 ABOULENIEN F, FUJIWARA W, NAMBA Y, et al. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(16): 6368 – 6373.

5 WANG M, SUN X, LI P, et al. A novel alternate feeding mode for semi-continuous anaerobic co-digestion of food waste with chicken manure[J]. Bioresource Technology, 2014, 164: 309 – 314.

6 BUJOCZEK G, OLESZKIEWICZ J, SPARLING R, et al. High solid anaerobic digestion of chicken manure [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(1): 51 – 60.

- 7 CALLAGHAN F, WASE D, THAYANITHY K, et al. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2002,22(1):71–77.
- 8 WANG X, YANG G, FENG Y, et al. Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw[J]. *Bioresource Technology*, 2012,120:78–83.
- 9 ZHANG T, YANG Y, LIU L, et al. Improved biogas production from chicken manure anaerobic digestion using cereal residues as co-substrates[J]. *Energy Fuel*, 2014,28(4):2490–2495.
- 10 FOTIDIS I, KOUGIAS P, ZAGANAS I, et al. Inoculum and zeolite synergistic effect on anaerobic digestion of poultry manure [J]. *Environment Technology*, 2014,35(10):1219–1225.
- 11 ANTAL M, GRØNLI M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8):1619–1640.
- 12 ZIMMERMAN A. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4):1295–1301.
- 13 GASKIN J, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(6):2061–2069.
- 14 KARAMI N, CLEMENTE R, MORENO-JIMENEZ E, et al. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011,191(1):41–48.
- 15 CAO X, MA L, GAO B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009,43(9):3285–3291.
- 16 DAS K, BALAGURUSAMY N, CHINNASAMY S. Biochars, methods of using biochars, methods of making biochars and reactors; US, 2012/0237994 A1 [P]. Google Patents, 2012–09–20.
- 17 MUMME J, SROCKE F, HEEG K, et al. Use of biochars in anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2014,164:189–197.
- 18 LUO C, LÜ F, SHAO L, et al. Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes[J]. *Water Research*, 2015, 68:710–718.
- 19 CHEN S, ROTARU A, SHRESTHA P, et al. Promoting interspecies electron transfer with biochar[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:1–6.
- 20 潘君廷,邱凌, Hassanein A,等. 添加生物炭对鸡粪厌氧消化产气特性影响正交试验[J]. *农业机械学报*,2014,45(12):229–233.
- PAN Junting, QIU Ling, HASSANEIN A, 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)
- 21 APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. Washington, DC:American Public Health Association (APHA),2005.
- 22 NIU Q, TAKEMURA Y, LI Y. Comparing mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of chicken manure: microbial community dynamics and process resilience[J]. *Waste Management*, 2015,43:114–122.
- 23 TORRI C, FABBRI D. Biochar enables anaerobic digestion of aqueous phase from intermediate pyrolysis of biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2014,172:335–341.
- 24 ABOUDI K, ALVAREZ-GALLEGO C, ISIDORO L, et al. Semi-continuous anaerobic co-digestion of sugar beet byproduct and pig manure: Effect of the organic loading rate (OLR) on process performance[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 194:283–290.
- 25 HABIBA L, HASSIB B, MOKTAR H. Improvement of activated sludge stabilisation and filterability during anaerobic digestion by fruit and vegetable waste addition[J]. *Bioresource Technology*, 2009,100:1555–1560.
- 26 KAYHANIAN M. Ammonia inhibition in high-solids biogasification: an overview and practical solutions[J]. *Environment Technology*, 1999,20:355–365.