刘金力, 洪秀杰, 白　岩, 等. 响应面法优化餐厨垃圾和牛粪混合两相厌氧发酵酸化条件[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1786-1793.
LIU Jin-li, HONG Xiu-jie, BAI Yan, et al. Optimization of the acidification condition in anaerobic fermentation of food waste and cow manure based on response surface methodology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1786-1793.

响应面法优化餐厨垃圾和牛粪混合两相厌氧发酵酸化条件

刘金力[1], 洪秀杰[2], 白　岩[1], 毕少杰[1], 杨宏志[3], 王彦杰[1*]

(1.黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院寒区环境微生物与农业废弃物资源化利用重点实验室, 黑龙江 大庆 163411; 2.大庆市农业技术推广中心, 黑龙江 大庆 163411; 3.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘　要: 为提高废弃物厌氧发酵的利用率,开展了牛粪和餐厨垃圾混合两相厌氧发酵过程中酸化条件优化的研究,探究在酸化相中搅拌频率、搅拌速率、酸化浓度、酸化时间和酸化温度对甲烷产率的影响。单因素试验结果表明,最佳的搅拌频率、搅拌速率、酸化浓度、酸化时间和酸化温度分别为:3次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$)、50 r·min^{-1}、12%、8 h和35 ℃。在单因素试验基础上,采用响应面法对发酵过程中酸化条件进行优化,以甲烷产率为响应值,选取酸化温度、酸化浓度和酸化时间3个因素研究其对发酵过程中产气率的影响。结果表明,对甲烷产率影响的大小顺序为酸化时间>酸化温度>酸化浓度。最佳的酸化条件为:酸化时间7.6 h、酸化温度35.8 ℃和酸化浓度10.4%;搅拌频率和搅拌速率分别为3次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$)和50 r·min^{-1}。采用最佳酸化条件处理后,混合原料的甲烷产率可达290.5 mL·g^{-1} VS,比未经酸化处理提高了17.9%。研究表明,对牛粪和餐厨垃圾两相厌氧发酵中酸化相的酸化条件进行优化,可提高甲烷产率、甲烷含量及VS去除率。

关键词: 餐厨垃圾;牛粪;厌氧发酵;响应面;酸化条件
中图分类号: X71　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2019)08-1786-08　　doi:10.11654/jaes.2019-0371

Optimization of the acidification condition in anaerobic fermentation of food waste and cow manure based on response surface methodology

LIU Jin-li[1], HONG Xiu-jie[2], BAI Yan[1], BI Shao-jie[1], YANG Hong-zhi[3], WANG Yan-jie[1*]

(1.Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Environmental Microbiology and Recycling of Agro-waste in Cold Region, College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163411, China; 2.Daqing Agricultural Technology Promotion Center, Daqing 163411, China; 3.Food College of Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing 163319, China)

Abstract: The objective of the study was to create appropriate conditions for waste recycling anaerobic fermentation. Therefore, the optimization of acidification conditions during the mixed anaerobic fermentation of food waste and cow manure was conducted using response surface methodology. Single factor experiments showed the optimal stirring frequency, stirring rate, acidification concentration, acidification time, and acidification temperature were 3 times·d^{-1}(2 min·time^{-1}), 50 r·min^{-1}, 12%, 8 h, and 35 ℃, respectively. Based on this, the fermentation process in acidification conditions was optimized. The effect of the three factors, acidification temperature, acid concentration, and acidification time on the fermentation process was studied using methane production rate as the response value. The results of the Box-Behnken design and response surface methodology showed the optimum fermentation was at 7.6 h, acidification time; 10.4%, acidification

收稿日期: 2019-04-06　　**录用日期:** 2019-07-04
作者简介: 刘金力(1996—),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,从事农业废弃物资源化利用的研究。E-mail:961665969@qq.com
***通信作者:** 王彦杰　E-mail:wangyanjie1972@163.com
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD080080203);黑龙江省重点实验室开放基金项目(201703);黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划(TDJH201809)
Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD080080203); Open Foundation of Heilongjiang Provincial Key Laboratory(201703); Support Program of Scientific Research Team and Platform of HBAU(TDJH201809)

concentration; and 35.8 ℃, acidification temperature. The optimal stirring frequency and speed were 3 times·d^{-1}(2 min·$time^{-1}$) and 50 r·min^{-1}, respectively. After the optimal acidification treatment, the methane production rate of the mixed raw material can reach 290.5 mL·g^{-1} VS, which is 17.9% higher than that of the raw material without the acidification treatment. Optimization of acidification conditions of the acidification phase in anaerobic fermentation of cow manure and kitchen waste can improve methane production rate, methane content, and volatile solid removal rate.

Keywords: food waste; cow manure; anaerobic fermentation; response surface; acidification condition

牛粪是常用的厌氧发酵原料,虽然其在厌氧发酵过程中产气稳定、对外界的环境缓冲能力强,但在单独的牛粪厌氧发酵体系中,微量元素和营养物质是有限的,难以为微生物生长活动提供均衡的营养[1],并且牛粪单独厌氧发酵周期长,这也限制了它的实际应用。餐厨垃圾的油脂、有机质和易降解的碳水化合物含量高,营养元素不均衡,其在厌氧发酵过程中易酸化。因此对牛粪和餐厨垃圾进行混合发酵以使其能够稳定高效地产气。

混合厌氧发酵技术是将两种及以上的有机原料进行同步消化,可以克服单一原料厌氧发酵的不足,增加甲烷产量,均衡体系中的营养成分,调节含水率[2]。一般认为,适宜厌氧微生物生长的C/N在20左右[3],牛粪C/N高于此值,并且缓冲pH能力强,而餐厨垃圾的C/N较低。已有研究将餐厨垃圾与牛粪进行混合厌氧发酵,发酵系统的缓冲能力得到增强,稳定性得到提高,取得了良好的产气效果[4-5]。厌氧发酵主要分为4个阶段:水解阶段、酸化阶段、产氢产乙酸阶段和产甲烷阶段。在牛粪和餐厨垃圾混合厌氧发酵过程中水解酸化是厌氧发酵产沼气的限速步骤[6-8]。酸化处理过程中温度的改变,将影响系统中微生物的生长和代谢,改变酸化产物组成和含量,导致甲烷产量的差异[9-10];时间的长短,影响着料液中VFAs的积累量和组成[11]。在单相厌氧消化系统中上述4个阶段反应同在一个反应器进行,而相对于传统单相厌氧消化,两相厌氧消化反应系统能为产酸相中产酸菌和产甲烷相中产甲烷菌提供其各自所需要的最佳生长条件。

响应面法可以在特定区间内寻求最优工艺参数和响应值,已广泛应用于培养条件和工艺条件的优化[12-13]。本试验以餐厨垃圾和牛粪为混合原料,研究酸化处理条件对两相厌氧发酵产甲烷的影响,在单因素试验的基础上,选取酸化时间、酸化浓度和酸化温度3个因素,利用中心组合设计试验,运用响应面分析法优化酸化处理条件,以期提高餐厨垃圾和牛粪混合物的甲烷产量,为其工程应用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验原料为牛粪和餐厨垃圾的混合物,牛粪和餐厨垃圾的比值为2∶1,其比值为挥发性固体干质量比。供试餐厨垃圾取自黑龙江八一农垦大学单位食堂,主要包括米饭、面食、蔬菜、肉类等学校食堂就餐后的剩余物,取回后用JJ-2B粉碎机(金坛市盛威试验仪器厂)机械打浆2 min。牛粪取自黑龙江省肇东市宋站镇奶牛养殖场新鲜牛粪。原料收集后均在-20 ℃条件下保存,使用前在4 ℃条件下解冻24 h。本实验室采用半连续发酵的方式通过添加餐厨垃圾驯化牛粪料液,将产气与pH稳定的料液经自然沉降,所得的上清液作为接种物[14]。餐厨垃圾和牛粪的主要特性见表1。

表1 餐厨垃圾和牛粪的特性

Table 1 The characteristics of food waste and dairy manure

项目 Items	TS/%	VS/%	C/%	N/%	C/N
餐厨垃圾	24.2±0.4	91.3±0.1	34.8±0.3	2.4±0.1	14.5±0.7
牛粪	22.3±0.2	70.4±0.4	49.6±0.1	1.5±0.1	33.1±1.1
混合料液	22.9±0.6	81.2±0.3	45.7±0.3	1.6±0.3	28.2±0.3

注:数据为平均值±标准差,碳氮含量测定时为烘干样品,其他为鲜样测量。

Note: Data is average ± standard deviation. The carbon and nitrogen content was measured by drying samples, and the other samples were measured by fresh samples.

1.2 试验装置

试验采用的酸化装置为1 L的螺口瓶,搅拌前安装搅拌器进行搅拌(图1)。发酵装置(图2)为拆除搅拌装置后的酸化装置,用硅胶塞密封,料液的装量为0.8 L。瓶塞上设有取样口和集气口,用1 L的铝箔集气袋收集产生的沼气。

1.3 单因素试验设计

试验采用批式厌氧消化方法,每个处理4次重复。将混合料液添加到酸化装置中,经酸化预处理后,添加接种物240 mL,稀释料液的浓度至6%,后通

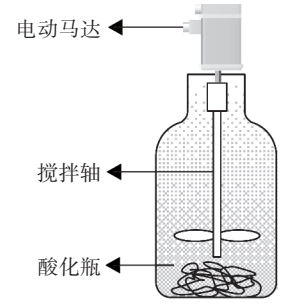


图1 酸化装置

Figure 1 Acidification apparatus

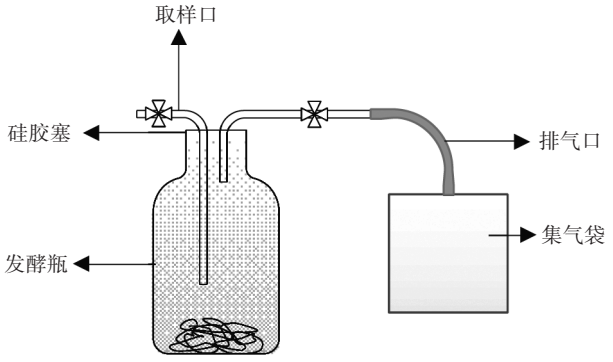


图2 发酵装置

Figure 2 Fermentation apparatus

入氮气5 min,使其形成厌氧环境。在35 ℃条件下厌氧发酵30 d。通过测定产气量和甲烷含量,计算甲烷产率,确定最佳的酸化条件。

在料液浓度为12%、搅拌转速为100 r·min^{-1}(2 min·次$^{-1}$)条件下,分别设定搅拌频率为0、1、2、3、4次·d^{-1},35 ℃条件下酸化处理12 h后,稀释料液浓度至6%,厌氧发酵30 d,测定甲烷产率,确定最佳的酸化搅拌频率。

在料液浓度为12%、搅拌频率为4次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$)条件下,分别设定搅拌速率为0、50、100、150、200 r·min^{-1},35 ℃条件下酸化处理12 h,稀释料液浓度至6%,厌氧发酵30 d,测定甲烷产率,确定最佳的酸化搅拌速率。

在料液浓度为12%、搅拌频率为4次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$、100 r·min^{-1})条件下,分别设定酸化温度为15、25、35、45、55 ℃,酸化处理12 h后,稀释料液浓度至6%,厌氧发酵30 d,测定甲烷产率,确定最佳的酸化温度。

设定料液浓度为8%、10%、12%、14%和16%,在搅拌频率为4次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$、100 r·min^{-1}),35 ℃条件下酸化处理12 h后,稀释料液浓度至6%,厌氧发酵30 d,测定甲烷产率,确定最佳的酸化浓度。

在料液浓度为12%、搅拌转速为4 次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$、100 r·min^{-1})条件下,分别设定酸化时间为0、4、8、12、16、20、24 h,35 ℃条件下进行酸化处理后,稀释料液浓度至6%,厌氧发酵30 d,测定甲烷产率,确定最佳的酸化时间。

1.4 响应面最优试验设计

根据Box-Behnken的中心组合试验设计原理,综合单因素试验结果,选取酸化温度、酸化浓度、酸化时间3个因素,采用3因素3水平的响应面分析方法设计试验。试验因素与水平设计见表2。

表2 响应面试验因素水平及编码

Table 2 Code and level for testing factors of response surface experiments

因素 Factor	试验因素水平 Level		
	−1	0	1
x_1酸化温度 Acidification temperature/℃	25	35	45
x_2酸化浓度 Acidification concentration/%	8	12	14
x_3酸化时间 Acidification time/h	4	8	12

1.5 酸化处理对厌氧发酵的影响

采用响应面分析法优化出最佳酸化处理条件,将混合原料装入图1的酸化装置中进行最佳酸化条件预处理,然后在35 ℃条件下,置于图2发酵装置中厌氧发酵30 d,测定产气率、甲烷总产量、甲烷含量和VS去除率。未酸化组直接置于图2中的厌氧发酵瓶中进行单相厌氧发酵。以未酸化处理直接厌氧发酵的处理作对照,进行产气率、甲烷总产量、甲烷含量和VS去除率数据的比较。

1.6 测定方法

TS和VS采用文献[15]中的标准方法测定。餐厨垃圾和牛粪的总氮和总碳采用multi N/C 3100总有机碳/总氮分析仪(Analytik Jena公司)测定(以干质量计),通过计算总碳与总氮的值求得C/N。将集气袋中的气体采用排水法测定产气量,采用GA2000便携式沼气分析仪(Geotech公司)测定甲烷含量。

1.7 统计分析

采用Design Expert 7.1.3软件的中心组合试验设计和响应面分析模块对重要因素的水平进行优化,通过响应面回归过程(RSREG)进行数据分析,建立酸化条件对甲烷总产量的二次回归模型。采用DPS 7.05软件进行数据分析。采用Origin 8.0软件作图。

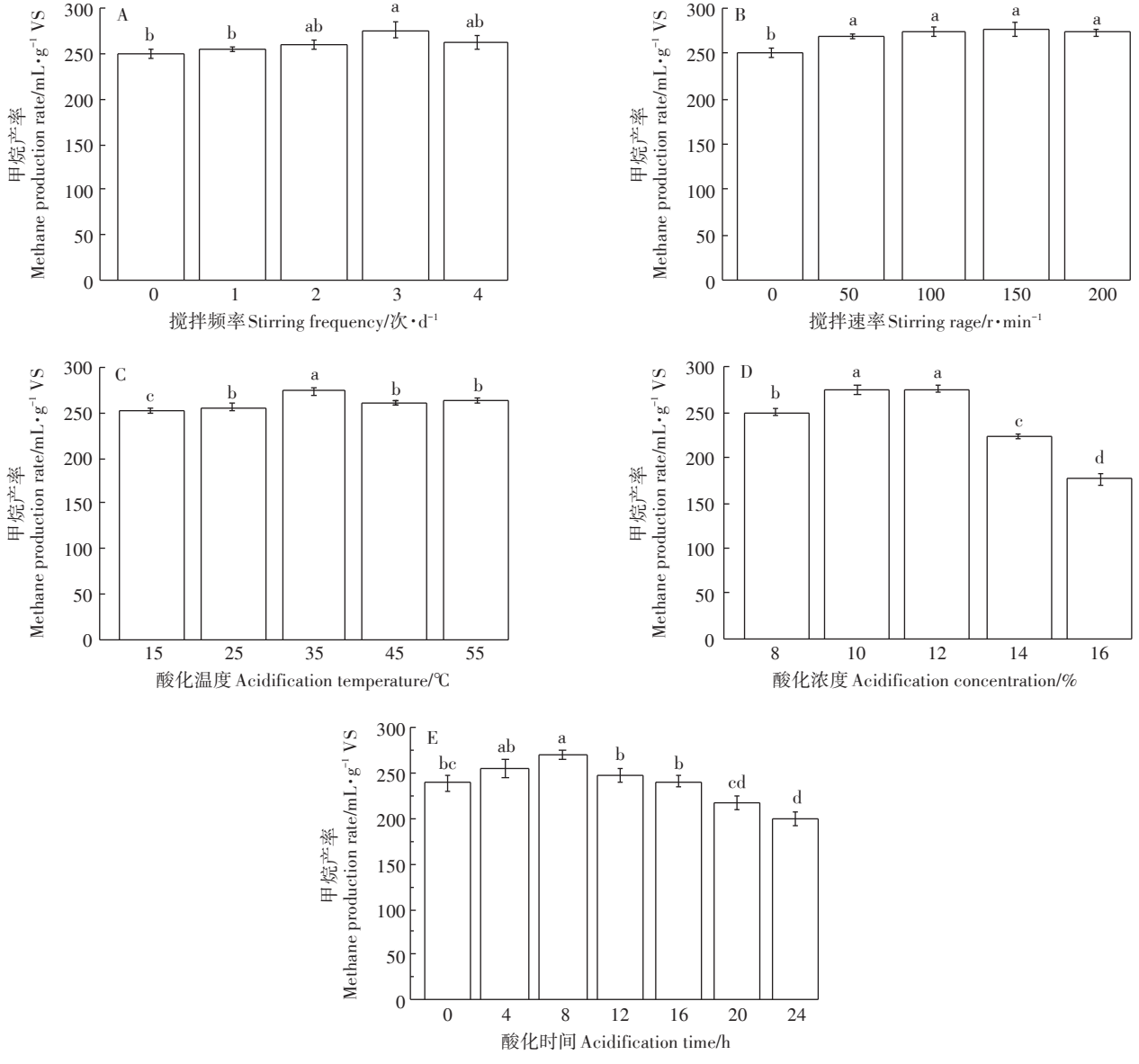
2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

通过单因素方差分析(One way ANOVA,Turkey法)发现,搅拌频率显著影响了混合原料厌氧发酵的产甲烷率,但搅拌频率超过2次·d^{-1}的各处理之间无显著差异(P>0.05,图3A)。搅拌频率为3次·d^{-1}时,产甲烷率达到最高值276.5 mL·g^{-1} VS。图3B显示,搅拌速率对混合原料的产甲烷率有显著影响,但搅拌速率超过50 r·min^{-1}的处理之间无显著差异(P>0.05),产甲烷率稳定在263.5~275.6 mL·g^{-1} VS。综合减少能耗和获得最高甲烷产量的考虑,最佳的搅拌条件为3次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$,50 r·min^{-1})。

图3C显示,酸化温度显著影响了混合原料的产甲烷率,最佳的酸化温度为35 ℃,产甲烷率达到最高值273.8 mL·g^{-1} VS。

从图3D可以发现,酸化浓度为10%和12%时的产甲烷率显著高于其他浓度处理(P<0.05),分别为274.4 mL·g^{-1} VS和275.9 mL·g^{-1} VS。较高的酸化浓度可以提高原料的处理效率,因此,最佳的酸化浓度



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)

The different lowercase letters indicate a significant difference(P<0.05) among different treatments

图3 搅拌频率(A)、搅拌速率(B)、酸化温度(C)、酸化浓度(D)和酸化时间(E)对甲烷产率的影响

Figure 3 Effect of (A)stirring frequency, (B)stirring rate, (C) acidification temperature, (D)acidification concentration and (E) acidification time on methane yield of mixed materials of food waste and manure

为12%。

随着酸化时间的延长，pH先降低再升高，当酸化时间超过一定范围，挥发性脂肪酸（VFAs）被嗜酸菌大量消耗，不利于后续产甲烷过程的进行。图3E显示，酸化时间显著影响了混合原料的产甲烷率，酸化时间为8 h时，获得最高的产甲烷率271.3 mL·g^{-1} VS。

2.2 响应面分析试验

在单因素试验的基础上，选取酸化温度（x_1）、酸化浓度（x_2）和酸化时间（x_3）3个因素，试验设计与结果见表3。

方差分析和酸化处理各因素的显著性比较结果见表4。利用Design-Expert软件对所得试验数据进行多元回归拟合，得到以甲烷产率为目标函数的二次多项回归模型：

$$Y=85.4+2.25x_1-9.25x_2-5.75x_3-x_1x_2-x_1x_3-4x_2x_3-15.95x_1^2-49.45x_2^2-26.95x_3^2$$

通过方差分析（表4）可知，模型的F=792.428 3>$F_{0.001}$，P<0.001，R^2=0.999 6，表明回归模型极显著；失拟项P=0.130 8>0.05，差异不显著，说明该模型能够反映响应值变化，试验误差小，可以用此模型对产甲烷率进行分析和预测。模型的一次项和二次项及x_2和x_3交互项的影响均为极显著。

图4、图5、图6是酸化温度、酸化浓度和酸化时间分别为35 ℃、12%和8 h的条件下，所得交互项的响应面图。可以看出，酸化温度（x_1）、酸化浓度（x_2）和酸化时间（x_3）3个因素与产甲烷率（Y）呈抛物线关系。3

表3 酸化条件下混合发酵甲烷产率的中心组合试验设计与结果

Table 3 Central composite design and results of experimental of methane production rate of anaerobic co-digestion of food waste and manure under acidification conditions

编码 No.	温度 Temperature/℃	浓度 Concentration/%	时间 Time/h	甲烷产率 Methane production rate/mL·g^{-1} VS
1	35	14	12	179
2	35	8	4	231
3	25	14	8	201
4	45	8	8	241
5	25	12	12	235
6	35	12	8	284
7	35	12	8	285
8	35	8	12	228
9	45	12	4	252
10	25	8	8	235
11	45	12	12	238
12	35	12	8	285
13	35	12	8	286
14	45	14	8	203
15	25	12	4	245
16	35	14	4	198
17	35	12	8	287

表4 酸化处理后餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵产甲烷率的回归方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of regression model of methane production of methane production rate of anaerobic co-digestion of food waste and manure under acidification conditions

方差来源 Variance source	调整平方和 Square sum	自由度 Degree of freedom	调整均方 Average of variance	F值 F value	P值 P value	显著性 Significant level
Model	19 052.24	9	2 116.916	792.428 3	<0.001	**
x_1	40.5	1	40.5	15.160 43	0.005 9	*
x_2	2 964.5	1	2 964.5	1 109.706	<0.001	**
x_3	264.5	1	264.5	99.010 7	<0.001	**
x_1x_2	4	1	4	1.497 326	0.260 7	
x_1x_3	4	1	4	1.497 326	0.260 7	
x_2x_3	64	1	64	23.957 22	0.001 8	*
x_1^2	1 071.168	1	1 071.168	400.972 1	<0.001	**
x_2^2	10 296.01	1	10 296.01	3 854.122	<0.001	**
x_3^2	3 058.116	1	3 058.116	1 144.749	<0.001	**
残差 Residual	18.7	7	2.671 429			
失拟项 Lack of fit	13.5	3	4.5	3.461 538	0.130 8	
纯误差 Pure error	5.2	4	1.3			
总离差 Summation	19 070.94	16				

注：*显著（P<0.05）；**极显著（P<0.001）。

Note: *significant (P<0.05); **highly significant (P<0.001).

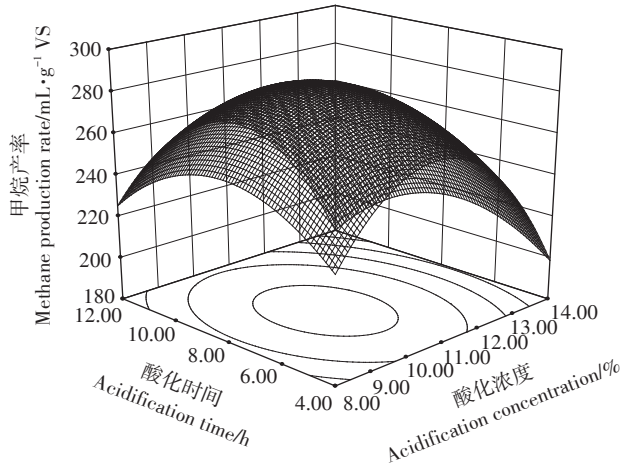


图4 $Y=f(35,x_2,x_3)$响应曲面图

Figure 4 $Y=f(35,x_2,x_3)$ Response of factor interaction

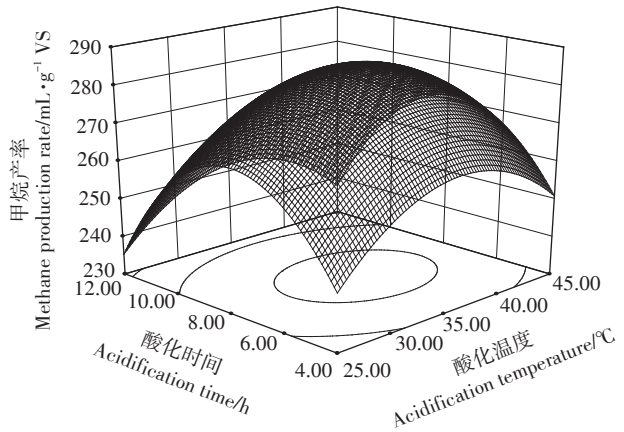


图5 $Y=f(x_1,12,x_3)$响应曲面图

Figure 5 $Y=f(x_1,12,x_3)$ Response of factor interaction

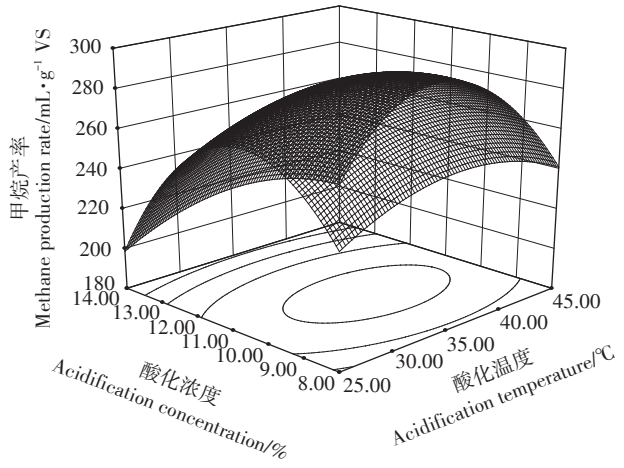


图6 $Y=f(x_1,x_2,8)$响应曲面图

Figure 6 $Y=f(x_1,x_2,8)$Response of factor interaction

个响应曲面均为开口向下的凸形曲面,且在所选范围内存在响应值的极高值,即响应面的最高点。

图4和图6表明,随着酸化浓度的增加,产甲烷率先升高,在酸化浓度为11%左右达到最高值,随着酸化浓度的继续提升,产甲烷率迅速下降至200 mL·g^{-1} VS;图4和图5表明,随着酸化时间的延长,产甲烷率也呈先升高再降低的趋势,酸化处理8 h,厌氧发酵产甲烷率最高;图5和图6表明,随着酸化温度的增加,产甲烷率先升高再降低,在酸化温度为35 ℃左右时达到最高值。综上所述,酸化温度、酸化浓度和酸化时间对厌氧发酵产甲烷率均呈显著性影响。

2.3 验证试验

由Design-Expert 8.0软件进行系统分析,预测出影响混合厌氧发酵甲烷产率的最佳酸化处理条件为:酸化温度35.80 ℃、酸化浓度10.42%和酸化时间7.62 h,预测值为287.60 mL·g^{-1} VS。结合实际操作过程中的局限性,最终确定修正后的最佳酸化处理条件为:酸化温度35.8 ℃、酸化浓度10.4%和酸化时间7.6 h,此时预测值为287.31 mL·g^{-1} VS。

为了验证模型的可靠性和准确性,在最佳酸化处理条件下进行验证试验,混合原料的产甲烷率为287.6 mL·g^{-1} VS,预测值与试验值的相对偏差为1.14%,小于5%,响应面分析法可以较好地预测实际的甲烷产率。因此,利用响应面分析法进行餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵酸化处理条件优化是可靠的。

2.4 酸化处理对厌氧发酵的影响

为验证酸化处理厌氧发酵的影响,将混合原料用自来水稀释到指定浓度后直接进行酸化,酸化过程中不添加接种物。酸化处理后,添加接种物240 mL,并用自来水调节发酵浓度至6%进行厌氧发酵。通过比较经最佳酸化条件处理的两相厌氧发酵及未酸化直接发酵的发酵效果,发现两相厌氧发酵的产气率、甲烷产率、甲烷含量和VS去除率比单相厌氧均有提高,分别提高了9.4%、17.9%、7.1%和23.6%(表5)。

表5 两相厌氧发酵与单相厌氧发酵主要参数比较

Table 5 Comparison of main parameters of anaerobic co-digestion of food waste and manure between with acidification and CK

发酵工艺 Treatments	产气率 Gas rate/ mL·g^{-1} VS	甲烷产率 Methane production/ mL·g^{-1} VS	甲烷含量 Methane content/%	VS去除率 VS removal rate/%
两相厌氧发酵 Acidification	384.6	290.5	75	68
单相厌氧发酵CK	351.6	246.3	70	55

3 讨论

混合原料两相厌氧发酵研究需要建立最佳的酸化条件和产甲烷条件[16-17],水解和酸化过程是两相厌氧工艺中的限速步骤,水解条件的优化对提高两相厌氧发酵效率至关重要[18],本研究对酸化条件进行了优化并得到了最佳的酸化条件,对产甲烷条件的优化还需进一步试验研究。

依据模型的系数估计值x_1=792.4、x_2=15.1和x_3=1 109.7,得到影响因子的主效应主次顺序为酸化时间(x_3)>酸化温度(x_1)>酸化浓度(x_2)。

搅拌可使料液均匀分布,促进热传递,利于微生物和原料的接触,促进原料水解酸化,为产甲烷相提供充足的底物[19]。合适的搅拌能够提升厌氧消化的潜力,在生产中搅拌频率和搅拌速度的具体数值选择上,还需考虑经济成本等多方面原因[20-22],本试验得出的数值可作为一个参考指标。此外,在酸化处理混合原料时,酸化装置没有密封,间断性的搅拌提高了物料中的溶氧量,可能使体系中的兼性厌氧菌得到快速增长,进而加快了水解酸化的进程,对其具体影响还需进一步分析。目前主流的评价标准是以VFAs为评价指标,但在两相厌氧发酵中的效果存在一定缺陷[23]。一般认为酸化过程中产生的VFAs越多,产甲烷量越高[13],但是不同的VFAs组成对产甲烷的贡献不同,如丙酸的累积甚至会抑制产甲烷过程的进行[24]。因此,仅将VFAs作为考察有机物质水解酸化效果的指标存在一定的缺陷。本试验主要目的是为在实际生产中获得更高的沼气产气量,因此,以产甲烷量为指标,考察了不同酸化条件对混合原料厌氧发酵的影响,确定了最佳的酸化工艺。采用本研究优化的酸化处理条件,混合原料两相发酵工艺的产气率、产甲烷率、甲烷含量和VS去除率均高于未经酸化处理的单相厌氧发酵工艺,这与刘爽[25]的研究结果基本一致。

将厌氧发酵过程中产酸相和产甲烷相分离,是优化了两者的各自功能,还是阻碍了两者的协同关系,尚不明确。但目前越来越多的研究表明,与传统的单相厌氧发酵技术相比,两相厌氧发酵工艺在处理高浓度有机废弃物时更具优势[26-27]。水解酸化过程是厌氧工艺中的限速步骤,优化水解酸化条件对提高两相厌氧发酵效率具有重要意义[28]。

4 结论

(1)酸化时间、酸化温度和酸化浓度3个因素均能显著影响甲烷产率,其对甲烷产率影响的大小为酸化时间>酸化温度>酸化浓度。最佳的产气条件为:浓度10.4%、温度35.8 ℃、处理时间7.6 h。

(2)最佳酸化条件处理的两相厌氧发酵与未处理单相厌氧发酵相比其产气率、甲烷产率、甲烷含量和VS去除率分别提高了9.4%、17.9%、7.1%和23.6%。

(3)通过差异显著性和产气量分析得到最适搅拌频率和搅拌速率分别为3次·d^{-1}(2 min·次$^{-1}$)和50 r·min^{-1}。

参考文献:

[1] Zhang C S, Xiao G, Peng L Y, et al. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 170-176.

[2] Kim W, Ryu B, Kim S, et al. Quantitative analysis of microbial community structure in two-phase anaerobic digesters treating food wastewater [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2014, 31(3): 381-385.

[3] 林云琴, 王德汉, 武书彬, 等. 造纸污泥和餐厨垃圾混合发酵联产氢气和甲烷试验[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2134-2139.
LIN Yun-qin, WANG De-han, Wu Shu-bin, et al. Hydrogen-methane production from paper mill sludge and food waste by anaerobic co-digestion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(9): 2134-2139.

[4] 朱洪艳. 餐厨垃圾与牛粪混合厌氧发酵及其非生物因子强化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015: 18-24.
ZHU Hong-yan. Research on anaerobic co-digestion of food waste and cow manure and promoting factor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015: 18-24.

[5] Arelli V, Begum S, Anupoju G R, et al. Dry anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure: Impact of total solids, substrate ratio and thermal pretreatment on methane yield and quality of biomanure[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253: 273-280.

[6] Marañón E, Castrillón L, Quiroga G, et al. Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production[J]. *Waste Management*, 2012, 32(10): 1821-1825.

[7] El-Mashad H M, Zhang R H. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(11): 4021-4028.

[8] Zhang C S, Xiao G, Peng L Y, et al. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 170-176.

[9] 李晶宇, 罗丽娜, 李文哲, 等. 温度对牛粪两相厌氧发酵特性的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 4027-4031.
LI Jing-yu, LUO Li-na, LI Wen-zhe, et al. Effect of different temperatures on two-phase anaerobic fermentation of cattle manure[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(8): 4027-4031.

[10] Ferrer I, Vazquez F, Font X. Long term operation of a thermophilic aerobic reactor: Process stability and efficiency at decreasing sludge retention time[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 2972-2980.

[11] Yang L L, Huang Y, Zhao M X, et al. Enhancing biogas generation

performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, 105: 153-159.

[12] 任天宝, 马孝琴, 徐桂转, 等. 响应面法优化玉米秸秆蒸汽爆破预处理条件[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 282-286.
REN Tian-bao, MA Xiao-qin, XU Gui-zhuan, et al. Optimizing steam explosion pretreatment conditions of corn stalk by response surface methodology[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 282-286.

[13] 贺 静, 邓雅月, 李 凛, 等. 废弃食用油脂两相厌氧发酵酸化条件优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 247-253.
HE Jing, DENG Ya-yue, LI Lin, et al. Process optimization of wasted edible oil hydrolytic acidification in two-phase anaerobic digestion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(19): 247-253.

[14] 龚咏梅, 穆晓丽, 赵秀兰. 餐厨垃圾与污泥联合两步厌氧发酵产酸阶段条件优化试验[J]. 环境化学, 2011, 30(4): 856-862.
GONG Yong-mei, MU Xiao-li, ZHAO Xiu-lan. Optimization of the acidogenic phase of two stage anaerobic fermentation process for biogas production from kitchen residue and sewage sludge[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(4): 856-862.

[15] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Washington D. C. : American Public Health Assoc, 1998.

[16] 刘建伟, 何 岩. 餐厨垃圾两相厌氧发酵技术研究和应用进展[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 188-196.
LIU Jian-wei, HE Yan. Research progress of two-phase anaerobic fermentation technology and application of kitchen waste science[J]. *Technology and Engineering*, 2017, 17(6): 188-196.

[17] Yeoh B G. Two phase anaerobic treatment of cane-molasses alcohol stillage[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Anaerobic Digestion, 1997: 208-215.

[18] Oktem Y A, Ince O, Donnelly T, et al. Determination of optimum operating conditions of an acidification reactor treating a chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(11): 2258-2263.

[19] 王延昌, 袁巧霞, 谢景欢, 等. 餐厨垃圾厌氧发酵特性的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(9): 1677-1682.
WANG Yan-chang, YUAN Qiao-xia, XIE Jing-huan, et al. Characteristic studies on anaerobic fermentation for kitchen waste[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(9): 1677-1682.

[20] 孙 宇, 付博锐, 刘 权, 等. 牛粪厌氧发酵酸化处理条件的优化[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1222-1229.
SUN Yu, FU Bo-rui, LIU Quan, et al. Optimization of cattle manure hydrolysis and acidification for methane production[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(9): 1222-1229.

[21] Kariyama I D, Zhai X, Wu B. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review[J]. *Water Research*, 2018, 143: 503-517.

[22] Singh B, Szamosi Z, Siménfalvi Z. State of the art on mixing in an anaerobic digester: A review[J]. *Renewable Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.072.

[23] 毕少杰, 孙 宇, 孙志远, 等. 酸化处理对牛粪厌氧发酵有机酸和细菌多样性的影响[J]. 中国沼气, 2015, 33(4): 18-25.
BI Shao-jie, SUN Yu, SUN Zhi-yuan, et al. Effect of acidification pretreatment on organic acid contents and bacterial communities in dairy manure and its anaerobic digestion performance[J]. *China Biogas*, 2015, 33(4): 18-25.

[24] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 85-110.
REN Nan-qi, WANG Ai-jie. Principle and application of anaerobic biotechnology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 85-110.

[25] 刘 爽. 混合原料厌氧发酵产氢产甲烷技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013: 35-42.
LIU Shuang. Technical research on hydrogen and methane production by anaerobic fermentation of mixed materials[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013: 35-42.

[26] Wojciech M, Budzianowski. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 1148-1171.

[27] Patrick B, Marcus F, Bernd O. Effect of ultrasound amplitude and reaction time on the anaerobic fermentation of chicken manure for biogas production[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 63: 109-113.

[28] Wang D L, Ai P, Yu L, et al. Comparing the hydrolysis and biogas production performance of alkali and acid pretreatments of rice straw using two-stage anaerobic fermentation[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 132: 47-55.