

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0561

周莎, 王晓娇, 张彤, 等. 2016. 鸡粪与麦秆混合厌氧发酵环境中各因子响应关系研究[J]. 环境科学学报, 36(3): 932-939

Zhou S, Wang X J, Zhang T, et al. 2016. Responsive relationship among factors influencing the anaerobic co-digestion of chicken manure and wheat straw [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(3): 932-939

鸡粪与麦秆混合厌氧发酵环境中各因子响应关系研究

周莎^{1,2}, 王晓娇^{1,2,*}, 张彤^{1,2}, 翟宁宁^{1,2}, 冯永忠^{1,2}, 任广鑫^{1,2}, 韩新辉^{1,2}, 杨改河^{1,2,*}

1. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100

2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 杨凌 712100

收稿日期: 2015-05-11

修回日期: 2015-07-03

录用日期: 2015-07-11

摘要: 为了探究发酵过程中各因子之间的相互响应关系, 以鸡粪和麦秆为发酵原料, 利用 Canoco4.5 软件对鸡粪/麦秆不同比例混合发酵条件下不同发酵阶段内各因子进行分析, 以阐明各发酵阶段内因子间的相互影响关系. 结果表明: 当鸡粪/麦秆以 5:5 的比例混合时, 能获得最佳单位甲烷产量 ($90.56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 以 VS 计). 在整个发酵过程中甲烷产气速率表现为先升高再降低的趋势, 将其根据产气速率的大小划分为 3 个阶段, 分别为第 I 阶段(预备期)、第 II 阶段(高峰期)、第 III 阶段(消退期). 不同发酵阶段影响单位甲烷产量的主效因子有一定的差异性, 其中, 第 II 阶段的主效因子为发酵基质的 C/N, 第 III 阶段为 pH 值. 各发酵阶段因子间相关性各异, 第一阶段因子间相关性最强, 此后相关性逐渐降低. 因此, 针对不同阶段各主效因子分别进行控制, 能够有效提高发酵效率.

关键词: PCA; 敏感性; 麦秆; 鸡粪; 厌氧发酵

文章编号: 0253-2468(2016)03-932-08

中图分类号: X705

文献标识码: A

Responsive relationship among factors influencing the anaerobic co-digestion of chicken manure and wheat straw

ZHOU Sha^{1,2}, WANG Xiaojiao^{1,2,*}, ZHANG Tong^{1,2}, ZHAI Ningning^{1,2}, FENG Yongzhong^{1,2}, REN Guangxin^{1,2}, HAN Xinhui^{1,2}, YANG Gaihe^{1,2,*}

1. College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100

2. Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling 712100

Received 11 May 2015;

received in revised form 3 July 2015;

accepted 11 July 2015

Abstract: Canoco 4.5 was used to analyze the mutual effect among factors influencing the co-digestion of chicken waste and wheat straw with different proportions during different stages. Results showed that methane yield increased first and then decreased, and reached the maximum methane yield of $90.56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ VS under 5:5 ratio of co-substrates. Methane production process could be divided into three stages according to the production rate, namely probationary period, peak period and subside period. Major factors differed in different stages, and the main control factor for methane yield in stage II and III were C/N ratio and pH, respectively. Analyses conclude that the intensity of correlation of internal factors in the first stage was the strongest, and it decreased over time. Therefore, controlling the main effect factors of different stages could be an effectively way to improve the efficiency of fermentation.

Keywords: PCA; sensitivity; straw; chicken manure; anaerobic co-digestion

1 引言 (Introduction)

厌氧发酵技术利用工农业废弃物生产沼气, 目前已经成为发展新型能源的重要途径, 被越来越多

的人接受并推广. 与此同时, 针对厌氧发酵技术的相关研究也逐渐深入. 人们在研究影响厌氧发酵效率的外界因子时发现, 温度是影响沼气产气率和发酵周期的重要生态因子, 例如, 白洁瑞等 (2009) 研究

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (No.Z109021511); 西北农林科技大学博士科研启动基金 (No.Z109021403)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.Z109021511) and the Doctor Scientific Research Foundation of Northwest A&F University (No.Z109021403)

作者简介: 周莎 (1990—), 女, E-mail: zhousha092@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn; w-xj@nwsuaf.edu.cn

Biography: ZHOU Sha (1990—), female, E-mail: zhousha092@126.com; * Corresponding author, E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn; w-xj@nwsuaf.edu.cn

发现,鸡粪秸秆配比的适宜温度为 30~35 ℃.也有研究表明,在 35 ℃时,牛粪厌氧发酵系统中各类功能微生物数量与比例最佳,有利于发酵液中挥发性脂肪酸(VFA)的产生及甲烷菌再利用(贾丽娟等,2014).最新的研究结果表明,C/N 成为调控发酵内部环境的重要因子,即当发酵原料的 C/N 处于 25:1~30:1 时,发酵液中 pH 值波动小,氨态氮浓度较低,自由氨含量较少,发酵系统稳定(Wang *et al.*, 2012; Ewa *et al.*, 2014; 艾平等,2010).有机氮通过氨化作用转化为氨态氮溶于发酵液内,当氨态氮含量在适宜的范围时,能缓冲发酵液酸化,平衡发酵液中 pH 值,有利于产甲烷菌生长繁殖,促进甲烷的产生(杜连柱等,2010).同时,碳素和氮素是构成微生物细胞的主要物质,也是微生物生长繁殖所需能量的重要来源,而发酵液中存在着数量庞大的微生物种群,这些微生物的生长繁殖都离不开 C、N 等营养元素(张万钦等,2013).

在厌氧发酵系统中,VFA 不仅是有机物水解的产物,也是产甲烷菌的利用底物,VFA 浓度的变化是评价水解酸化及产甲烷效率的重要指标(余益辉等,2015; Zonta *et al.*, 2013; 张洪宾等,2012).发酵环境中 VFA 浓度的变化会引起 pH 值的变化,还原糖通过复杂的物质转化过程形成各种挥发性酸(Jin *et al.*, 2014; 杨洋等,2014),也作用于 pH 值,氨态氮

对发酵液的酸化具有一定的缓冲能力(Nges *et al.*, 2012).当 pH 值在 7.0 左右波动时,产甲烷菌含量增加;当 pH 值低于 6.6 时,产甲烷菌含量减少(Ogejo *et al.*, 2009),pH 值与产气量呈显著正相关(张彤等,2010).诸多研究表明,发酵内部环境对甲烷产量具有重要的调控作用,各指标间也具有一定的相关性.目前,对于影响发酵状态的因素报道较多,但对影响发酵效果因素的挑选、排列及指标间相关性强弱的研究相对较少.因此,本试验将发酵环境温度控制在较优的条件下(35 ℃),以鸡粪和麦秆为发酵原料,研究不同发酵阶段内部因子与单位甲烷产量间的相关性,并将各因子对单位甲烷产量影响的强弱关系进行排列,通过排列顺序得出影响甲烷产量的关键因子,以阐明各因子之间的相互响应关系,为实际生产提供更科学有效的指导.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 发酵原料与接种物

发酵原料为新鲜的鸡粪和自然风干的小麦秸秆,接种物来源于运行正常的常规厌氧发酵沼气的发酵沼液.麦秆来自于西北农林科技大学试验田,鸡粪、沼液来自于西北农林科技大学附近农户,发酵原料特性见表 1.

表 1 发酵原料特性

Table 1 Chemical characteristics of raw materials

原料	C/(g·kg ⁻¹)	N/(g·kg ⁻¹)	C/N	TS	VS
鸡粪	388.41	25.27	15.37	67.78%	84.50%
麦秆	392.37	7.42	52.88	89.30%	87.30%
接种物	263.80	16.3	16.18	5.50%	70.10%

2.2 试验装置

本试验采用陕西省循环农业工程技术研究中心实验室自行设置的恒温厌氧发酵装置.由容量 1 L 的三角瓶组成发酵装置及集气装置,2.5 L 的塑料壶代替量筒以收集排出的水,各装置间通过橡胶管和玻璃管连接,将连接好的发酵装置放置于恒温水槽内,水浴加热,由温控仪(PC-1000)和显示器

控制发酵温度,温度波动范围为±2 ℃.

2.3 试验设计

发酵原料为鸡粪和麦秆,麦秆经自然风干后剪切成 2~3 cm 小段备用.试验设 5 个处理组,各处理组设 3 个重复,不同处理分别记为 T1、T2、T3、T4、T5,将鸡粪与麦秆按表 2 的物料量分别添加至发酵瓶中,置于(35±2) ℃恒温水槽中,进行厌氧发酵试验.

表 2 发酵料液配置表

Table 2 Quantity of materials and water of fermenting liquid

发酵组	总固体含量	鸡粪/麦秆	鸡粪/g	麦秆/g	蒸馏水/g	沼液/g	总量/g
T1		1:9	6.43	57.83	335.74		
T2	8%	3:7	20.28	47.32	332.40	300	700

续表2

发酵组	总固体含量	鸡粪/麦秆	鸡粪/g	麦秆/g	蒸馏水/g	沼液/g	总量/g
T3		5:5	35.65	35.65	328.70		
T4		7:3	52.81	22.63	324.56		
T5	8%	9:1	72.07	8.01	319.92	300	700
CK		单独鸡粪	82.62	0	317.38		

注:鸡粪、麦秆质量均为湿重。

2.4 测定项目与方法

采用烘干法测定总固体(TS)、挥发性固体(VS)(张彤等,2014);采用排水集气法测定日产气量;使用 ZS-2 型沼气气体成分分析仪测定甲烷成分;每次取样测指标时,用智能 pH 计(pHs-3CT 型)测定发酵环境中的 pH 值;利用 DNS 比色法测定还原糖含量(陈毓荃,2002),比色法测定挥发性脂肪酸(VFA)含量,蒸馏-滴定法测定氨态氮含量(张彤等,2014),总凯氏氮采用凯氏定氮法用全自动凯氏定氮仪(UDK159 型,意大利 VELP Scientifica 公司)测定,总有机碳用 $K_2Cr_2O_7$ -外热源法测定(张彤等,2014);碳氮比为总有机碳质量与总凯氏氮的比值.绘图用 Origin 7.5 软件及 Canoco4.5 软件,方差分析用 SPSS Statistics 17.0 进行.

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 鸡粪与麦秆混合比例对厌氧发酵甲烷产量变化的影响

如图 1 所示,单位甲烷产量随着鸡粪/麦秆比例的增加表现出先增加后减小的趋势.当鸡粪与麦秆的比例为 5:5 时(T3 处理),单位甲烷产量最高($90.56 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,以 VS 计).随着鸡粪比例的增加,单位甲烷产量逐渐降低.方差分析结果显示,处理组 T2、T3、T4、T5、CK 相比处理组 T1 其单位甲烷产量增加显著($p < 0.05$).与单一鸡粪发酵组(CK)相比,

T2、T3、T4、T5 组单位甲烷产量均表现出不同程度的增加,其中,T2、T3 差异性显著($p < 0.05$),而处理组 T4、T5 差异性不显著.

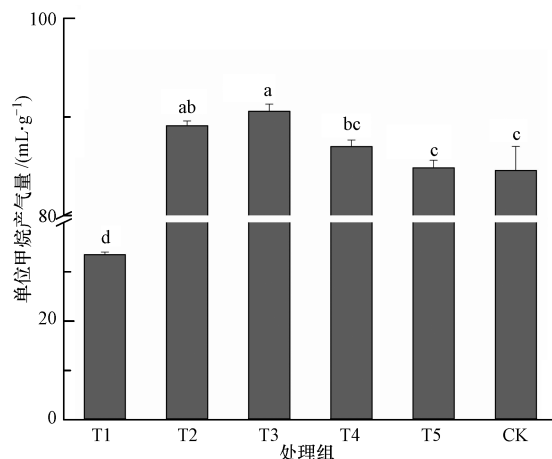
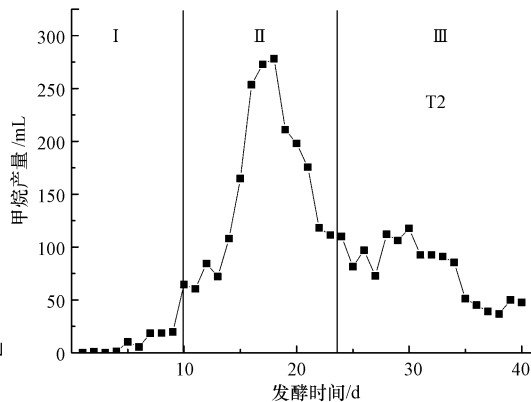
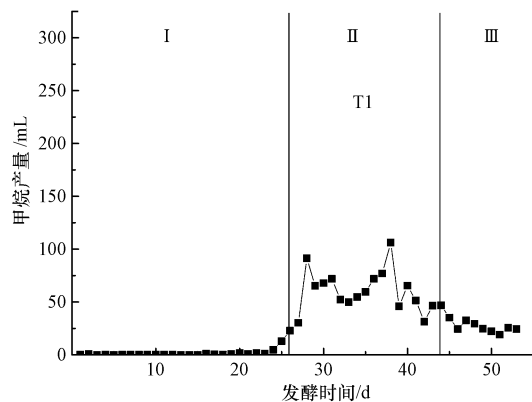


图 1 不同处理下单位甲烷产量

Fig.1 Variation of methane potential under different treatment

如图 2 所示,通过对不同处理下甲烷日产量的测定表明,在整个发酵过程中甲烷日产量均出现先升高再降低的趋势.根据产气量的大小将其划分为 3 个阶段,其中,第 I 阶段为预备期,此阶段受到酸化作用的影响,甲烷产量低;第 II 阶段为高峰期,随着发酵进入产甲烷阶段,该时期表现为整个发酵过程中产甲烷最为集中的时期;第 III 阶段为消退期,此阶段甲烷产量逐渐降低且趋于稳定,标志整个发酵



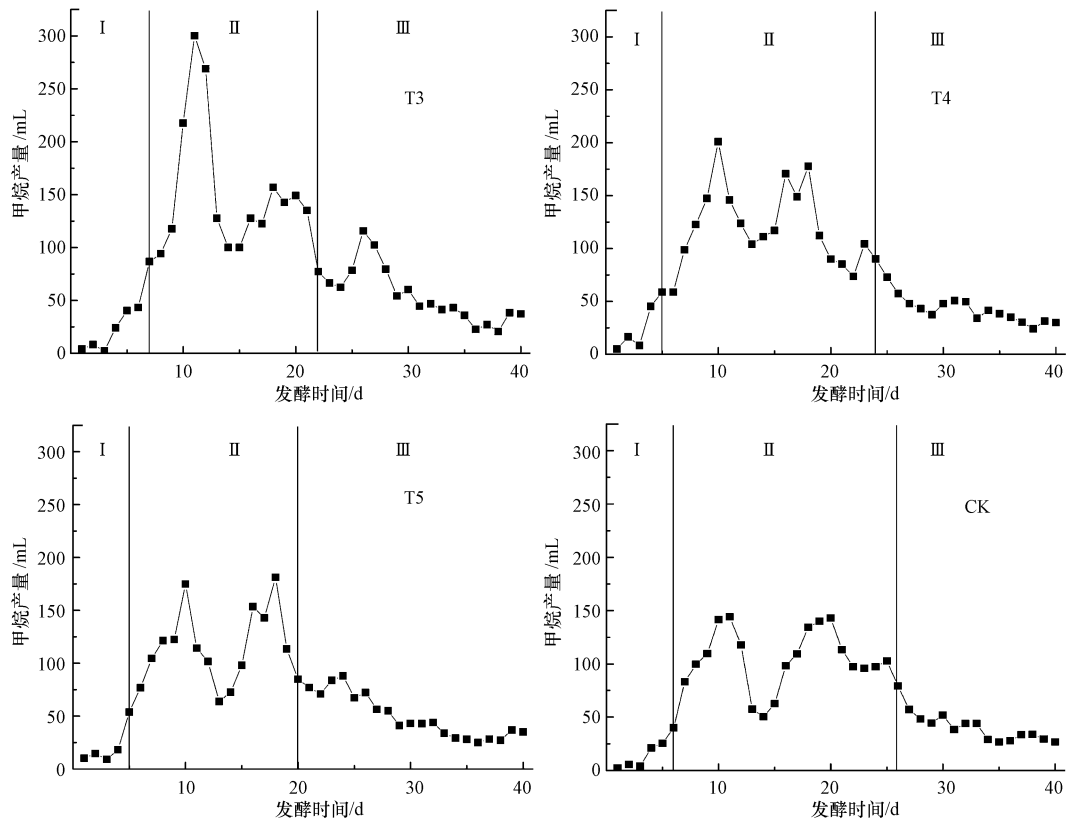


图2 不同处理下甲烷产气速率的变化

Fig.2 The variation of methane production rate under different treatment

过程进入末期.通过比较各处理组间的发酵表现发现,T1组第I阶段历时最长,为25 d,其他各处理组均在10 d之内,T4、T5处理组最短,为4 d.各处理组在经历不同时长的产气预备期后纷纷进入产甲烷高峰期,其中,T2、T3处理组最高峰相比其他各组表现得更为突出;除T2组外,其他各组均有明显的两次产甲烷高峰期;另外,对各组产甲烷高峰期的持续时间分析可知,T1、T4及CK处理组持续时间相对较长,为19~21 d,T2、T3及T5处理组持续时间较短,为15~16 d.产甲烷高峰期结束之后,各组甲烷日产量逐渐降低并稳定,发酵进入末期.

3.2 不同发酵阶段中各因子与单位甲烷产量间的响应关系

测定各处理组不同发酵阶段的指标,并得到同一阶段内各指标的平均值(表3).利用Canoco4.5软件,对鸡粪与麦秆不同发酵阶段中单位甲烷产量与发酵基质中C、N含量及对应发酵阶段各指标的平均水平进行分析,得二维PCA图(图3),其中,各指标间夹角余弦值的绝对值越大,表明二者间相关性越强,若夹角余弦值为正值,表明二者间具有正相关性,夹角余弦值为负值,则表现为负相关性.

表3 不同发酵阶段各指标值

Table 3 The index of different treatment in each stage

发酵阶段	处理组	VS产气率/ (mL·g ⁻¹)	pH值	VFA/ (mg·L ⁻¹)	氨态氮/ (mg·L ⁻¹)	还原糖/ (mg·L ⁻¹)	C含量/ (g·kg ⁻¹)	N含量/ (g·kg ⁻¹)	C/N
I	T1	1.23	5.6	2682.98	804.16	370.91	391.97	8.76	44.75
	T2	1.85	5.7	2470.90	764.96	391.46	391.18	11.44	34.20
	T3	3.22	6.5	2379.19	1008.00	319.99	390.39	14.12	27.65
	T4	3.76	7.0	2001.76	1178.24	327.14	389.60	16.80	23.19
	T5	1.57	7.1	1874.78	1245.44	339.65	388.81	19.45	19.96
	CK	1.83	7.0	1848.32	1240.96	298.55	388.41	20.82	18.66

续表3

发酵阶段	处理组	VS 产气率/ ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	pH 值	VFA/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	还原糖/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	C 含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	N 含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	C/N
II	T1	25.59	7.0	1835.10	911.68	306.30	333.95	7.47	44.71
	T2	56.90	7.0	1677.84	1022.56	319.99	334.81	11.24	29.79
	T3	61.50	7.3	1056.44	1135.68	358.41	304.37	11.05	27.54
	T4	63.48	7.4	858.02	1144.64	384.31	302.44	13.65	22.16
	T5	53.60	7.4	744.27	1267.47	377.17	347.65	15.80	22.01
	CK	66.02	7.4	967.37	1375.36	330.71	350.29	16.04	21.84
III	T1	5.61	7.1	354.21	689.34	254.35	324.38	6.52	49.74
	T2	30.34	7.6	402.12	764.40	262.22	331.05	9.43	35.11
	T3	25.84	7.4	269.25	1056.72	275.33	300.91	9.38	32.09
	T4	15.88	7.5	232.80	1127.84	271.16	301.32	11.38	26.47
	T5	29.66	7.5	247.50	1296.40	255.67	336.06	13.77	24.41
	CK	16.72	7.5	274.54	1494.64	257.46	344.45	15.88	21.69

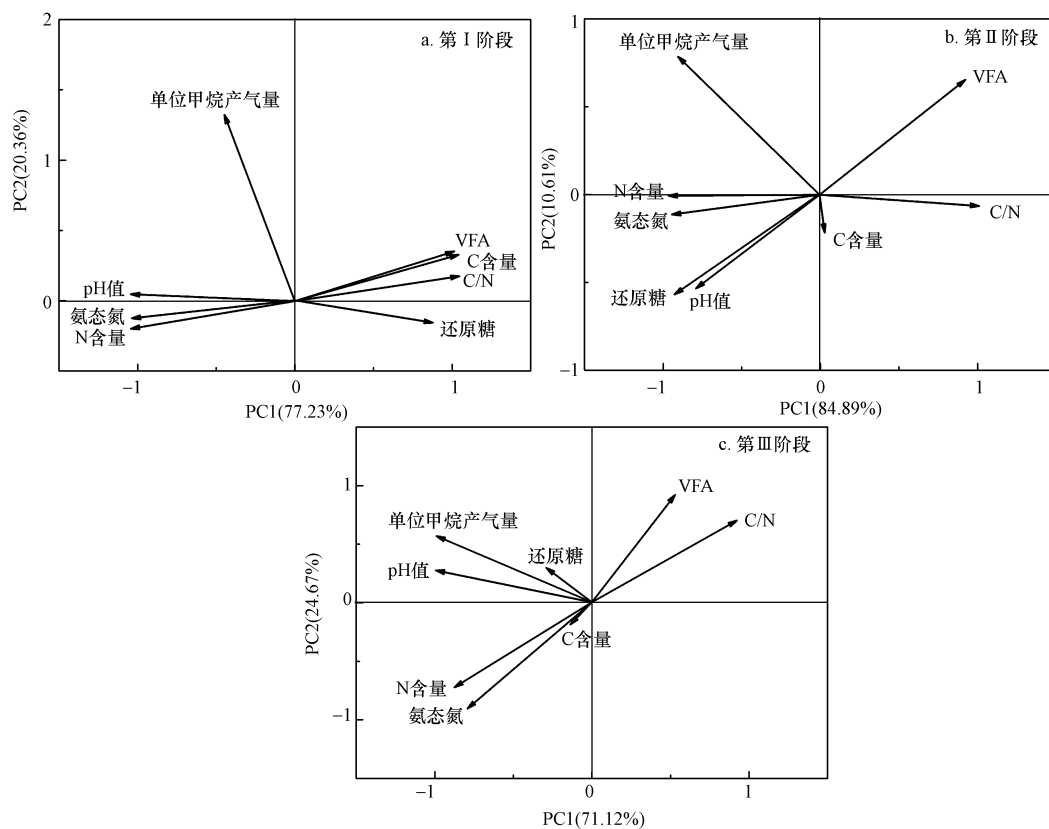


图3 不同发酵阶段各因子间的PCA分析

Fig.3 Principal Component Analysis of index in each stage

由PCA图(图3)可以看出,不同发酵阶段,单位甲烷产量与各指标的相关性不同,指标间的相关性也各有差异.当发酵处于第I阶段时,单位甲烷产量与发酵系统内各指标均表现出极弱的相关性,该阶段各发酵原料刚进入发酵系统,各因子稳定性较差,而各因子间的互作关系较强,表现为整个发酵

过程的最佳活跃期.对各因子进行相关性分析可知(图3a),VFA与各因子间的相关性强弱顺序排列为:C含量>N含量>C/N>氨态氮>pH值>还原糖,其中,C含量、C/N、还原糖含量与VFA表现为正相关性,N含量、氨态氮、pH值与VFA呈负相关;氨态氮与C/N相关性最强,其次为:N含量>pH值>C含

量>VFA>还原糖,除 N 含量与 pH 值外,其他各因子与氨态氮间均呈负相关;发酵液内 pH 值的变化与还原糖含量的相关性最强,其次为:氨态氮>C/N>N 含量>C 含量>VFA,除 N 含量及氨态氮与 pH 值呈正相关性外,其余各因子均表现为负相关性;还原糖与各因子间相关性的排列顺序为:pH 值>氨态氮>C/N>N 含量>C 含量>VFA。

各组在历经不同时长的产甲烷预备期后,进入第 II 阶段(产甲烷高峰期,图 3b)。由图 2 可以看出,该阶段甲烷产量极不稳定,是整个发酵过程中产甲烷最活跃的阶段,此时单位甲烷产量与各因子间的相关性较第 I 阶段表现明显,主要与发酵基质中 C、N 含量的相关性较强,具体排列为:C/N>C 含量>N 含量,而与发酵液内各因子的相关性极弱。各因子间的相关性也发生变化,与第 I 阶段相比,整体相关性降低,而 VFA 含量与 pH 值、还原糖含量呈现出极强的负相关性,且与 pH 值间的相关系数为-1,即此阶段发酵液内 VFA 与 pH 值成反比,而与其他各因子间的相关性则较弱;氨态氮与各因子间相关性强弱顺序表现为:N 含量>C/N>还原糖>pH 值>VFA,与 N 含量呈较强正相关性,与 C/N 呈较强负相关性,与其他各因子间相关性较弱,与 C 含量无相关性;pH 值与 VFA 及还原糖含量相关性极强,与其他各因子相关性较弱,与第 I 阶段不同的是,该阶段还原糖与 pH 值间呈极强的正相关性。

产甲烷高峰结束后,发酵系统内各因子逐渐稳定,此阶段单位甲烷产量与各因子间相关性增强,而各因子间的相关性相对前两个阶段减弱(图 3c)。单位甲烷产量与 pH 值、还原糖及 C/N 的相关性较强,与其他各因子间相关性弱,且与 pH 值、还原糖呈正相关,与 C/N 呈负相关。VFA 与各因子间相关性强弱关系依次为:C 含量>氨态氮>N 含量>C/N>pH 值>还原糖,除 C/N 外,其他各因子与 VFA 均表现为负相关性。氨态氮与 C、N 含量间呈现正相关性,与 VFA、C/N 呈极强的负相关性,与其他各因子相关性较弱;pH 值与还原糖含量间的正相关性较强,与其他各因子间的相关性则表现较弱。

4 讨论 (Discussion)

4.1 鸡粪与麦秆混合比例对厌氧发酵单位甲烷产量变化的影响

本研究结果表明,与单一鸡粪发酵相比,鸡粪/麦秆混合厌氧发酵能有效地提高单位甲烷产量(图

1),这与鸡粪/麦秆混合能平衡发酵环境中 C/N、丰富发酵环境中微生物种类、促进发酵液中各指标间的互作有关。然而,这种提高速率并不是随着鸡粪与麦秆混合比例的增加而增加,当鸡粪/麦秆混合比例在一定范围时,发酵表现出较明显的产气优势,超出范围,产气优势减弱。当麦秆比例较高时,其木质素和植物蜡质等难降解物质增加,发酵原料分解速率缓慢、水解率低,导致短期内发酵条件难以满足厌氧微生物的生长繁殖,预备期过长,影响产气效率(图 2, T1);当鸡粪/麦秆比例大于或等于 7:3 时,发酵系统的产甲烷优势消失,造成这一现象的原因在于,N 含量的升高使得发酵环境向着不利于微生物生长的方向发展,导致产气量无明显提升。相较同类研究,本试验 VS 产气量偏低,这可能与鸡粪特性及鸡粪与麦秆之间的相互作用关系有关。由表 3 可见,当发酵进入第 II 阶段时,单独鸡粪的 VS 甲烷产气量高于鸡粪/麦秆混合发酵组,这说明该阶段内鸡粪与麦秆混合发酵对甲烷产气量表现出一定的阻碍作用,引起该现象的原因可能在于鸡粪/麦秆混合发酵当中麦秆的纤维素、蜡质等含量较高,其降解速率缓慢,不能满足发酵需求从而影响产气量。同时,鸡粪/麦秆混合对甲烷产气量的提高优势出现在发酵消退期,这可能与发酵底物的降解程度有关,当发酵原料达到充分降解时,发酵环境中供给各类微生物的物质能量更加充足,微生物活性增强,发酵效率提高。

4.2 不同发酵阶段各因子间的响应关系

纵观整个发酵过程,甲烷日产量表现出明显的阶段性特征(图 2)。当发酵处于第 I 阶段时,甲烷产量极低,且各组历时长短不一,这与发酵系统内各因素水平有关。此阶段发酵环境的 pH 值直接影响发酵系统内的微生物种群结构,还原糖、VFA 及氨态氮同时作用于 pH 值。由于此阶段发酵液中微生物种群较单一,由还原糖转化的酸类物质无法及时地被消耗,导致酸累积,pH 值降低。不适宜的 pH 值抑制产甲烷菌活性,降低 VFA 利用率,使酸抑制现象进一步增强。而发酵液内氨态氮对酸化具有缓冲作用,由于各组发酵状态不一,使得发酵初期的酸化水解阶段时长各异。陈光银等(2011)、祝静等(2014)研究指出,发酵原料中的有机氮可以通过微生物的氨化作用转化为氨态氮溶入发酵液。该试验中,鸡粪的 N 含量比麦秆高 3.41 倍(表 1),因此,鸡粪比例的升高使发酵环境中氮含量升高。此阶段 pH 值随着氨

态氮的增加而增加,随着还原糖、VFA 含量的增加而减小,氨态氮与还原糖、VFA 之间相互拮抗,还原糖、VFA 对发酵液内 pH 值的影响较氨态氮大,因此,pH 值呈现出整个发酵过程的最低值.当发酵系统内还原糖、VFA、氨态氮同时调控 pH 值时,适宜的 含量比例能使 pH 值迅速达到有利于产甲烷微生物种群生长繁殖的水平,进而缩短预备期,尽早进入产甲烷期.

当发酵进入第 II 阶段时,单位甲烷产量与各因子间的相关性增强,各因子间的相互作用关系也发生变化(图 3b),此阶段影响单位甲烷产量的主效因子为 C/N.第 I 阶段累积的 VFA 由于产甲烷菌的消耗而降低,使得发酵液内 pH 值升高,更适宜产甲烷菌生长繁殖的条件,促进甲烷产生.该阶段内 VFA 与发酵基质中 C、N 含量的相关性有所下降,这种相关性降低的原因可能来源于第 I 阶段 C、N 的消耗,使得第 II 阶段内 C/N 恰好处于适宜微生物生长的环境,进而 C/N 与 VFA 之间达到一种稳定供给的关系,甲烷产量升高.本研究中发现,该阶段还原糖含量与 pH 值表现出与第 I 阶段完全相反的相关性(图 3b),由此说明,该阶段内还原糖的作用发生了变化.除此之外,各发酵组在发酵第 II 阶段产气峰值表现各异(图 2),除 T2 组出现一次产甲烷峰值外,其他各组均表现出两次峰值,且峰值随着鸡粪添加比例的增加而增强,这与鸡粪本身的发酵特性有关.在混合厌氧发酵过程中,当鸡粪与麦秆的比例达到一定范围,其降解的物质在同一时间内达到充分协同时,出现集中峰值(T2 组).

经过较长的产甲烷高峰期后,甲烷日产量逐渐降低并趋于平稳,该阶段单位甲烷产量与各因子间的相关性增强,各因子间的相关性普遍减弱(图 3c).这与发酵环境逐渐稳定,各因子水平的变化幅度减小有关.此时影响单位甲烷产量最主要的因子是 pH 值,而该阶段内 pH 值与各因子间的相关性均降低,表明各因子对 pH 值的调控作用减弱;同时,VFA 的大量消耗,使得供给产甲烷菌利用的物质减少;N 素持续不断地转化为氨态氮,使得发酵液内氨态氮含量超过微生物厌氧发酵的适宜范围(王晓娇等,2014),最终导致发酵过程受阻,产气率降低.该阶段中 C 含量与氨态氮含量表现出极强的正相关性,说明发酵原料中 C 含量的变化使得发酵系统中微生物种群发生变化,导致微生物转化 C、N 源的过程受到影响.另外,C 含量的变化使得发酵性细菌和

产氢产乙酸菌产生的供产甲烷菌产甲烷的物质不同,因此,产甲烷菌的代谢类型和丰度差异发生变化(李秋敏等,2015),各种群间的相互作用关系也随之发生变化,进而影响甲烷的产生.

5 结论(Conclusions)

1) 由于鸡粪与麦秆的产气特性所致,在 35 °C 条件下,鸡粪与麦秆以 5:5 的干物质混合厌氧发酵时,可获得最大单位甲烷产量 90.56 mL·g⁻¹(以 VS 计).

2) 不同发酵阶段各因子对单位甲烷产量的敏感性不同.第 II 阶段,单位甲烷产量对 C/N 的敏感性表现较强,维持该阶段的最适 C/N 能使产甲烷期延长,提高产甲烷效率;而第 III 阶段,单位甲烷产量对 pH 值敏感性极强,调节 pH 值能使得后期甲烷产量趋于稳定.

3) 不同发酵阶段发酵环境内各因子间的相互作用各异.第一阶段因子间相关性最强,其中,pH 值与氨态氮呈正相关,与 VFA、还原糖呈负相关;第二阶段 pH 值与还原糖呈正相关性,VFA 与 C/N 间呈现稳定供给关系;第三阶段因子间的相关性最低,C 含量与氨态氮呈现正相关性.

责任作者简介:杨改河(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事生物质能与循环农业技术研究.E-mail:ygh@nwsuaf.edu.cn.

王晓娇(1984—),女,讲师,主要从事农业废弃物处理与循环农业技术研究.E-mail:w-xj@nwsuaf.edu.cn.

参考文献(References):

- 艾平,张衍林,盛凯,等.2010.稻秸厌氧发酵产沼气预处理[J].农业工程学报,26(7):266-271
- 白洁瑞,李铁冰,郭欧燕,等.2009.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,25(2):188-193
- 陈广银,郑正,常志州,等.2011.不同氮源对麦秆厌氧消化过程的影响[J].中国环境科学,31(1):73-77
- 陈毓荃.2002.生物化学实验方法和技术[M].北京:科学出版社
- 杜连柱,陈羚,杨鹏,等.2010.猪粪秸秆不同物料比对固体产酸发酵效果的影响[J].农业工程学报,26(7):272-276
- Ewa K, Jerzy T. 2014. Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34:491-500
- 贾丽娟,俞芳,宁平,等.2014.温度底物浓度和微量元素对牛粪厌氧发酵产沼气的影 响[J].农业工程学报,30(22):260-266
- Jin W Y, Xu X C, Gao Y, et al. 2014. Anaerobic fermentation of biogas

- liquid pretreated maize straw by rumen microorganisms in vitro[J]. *Bioresource Technology*, 153: 8-14
- 李秋敏, 吴燕, 董明华, 等. 2015. 云南热带户用沼气池的原核生物群落结构研究[J]. *微生物学通报*, 42(1): 54-63
- Nges I A, Björnsson L. 2012. High methane yields and stable operation during anaerobic digestion of nutrient-supplemented energy crop mixtures[J]. *Biomass and Bioenergy*, 47: 62-70
- Ogejo J A, Wen Z, Ignosh J, *et al.* 2009. *Biomethane Technology*, Virginia Cooperative Extension, Publication, 442-881
- Wang X J, Yang G H, Feng Y Z, *et al.* 2012. 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*, 120: 78-83
- Wang X J, Lu X G, Li F, *et al.* 2014. Effects of temperature and carbon-nitrogen(C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition[J]. *Plos One*, 59(5): 1-7
- 余益辉, 黄振兴, 高树梅, 等. 2015. 固相餐厨垃圾厌氧发酵特性[J]. *环境工程学报*, 9(1): 355-361
- 杨洋, 夏天明, 祝超伟, 等. 2014. 预处理方法对香蒲厌氧发酵联产 H₂-CH₄效能的影响[J]. *环境科学研究*, 27(2): 164-171
- 张洪宾, 谷洁, 孙薇, 等. 2012. 不同原料对比对厌氧发酵过程中产气量、VFA 和脱氢酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 31(2): 422-427
- 祝静, 袁林江, 魏勃. 2014. 厌氧产氢 ASBR 对氨的脱除[J]. *环境工程学报*, 8(4): 1273-1277
- 张彤, 李伟, 李文静, 等. 2010. 粪秆结构配比厌氧发酵中 pH、VFA 与产气效果的关系[J]. *农业环境科学学报*, 29(12): 2425-2430
- 张彤. 2014. 羊粪厌氧消化影响因素分析及产气特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学
- 张万钦, 吴树彪, 郎乾乾, 等. 2013. 微量元素对沼气厌氧发酵的影响[J]. *农业工程学报*, 29(10): 1-11
- Zonta Z, Alves M M, Flotats X, *et al.* 2013. Modelling inhibitory effects of long chain fatty acids in the anaerobic digestion process[J]. *Water Research*, 47(3): 1369-1380