

酒糟与秸秆混合厌氧消化产沼气特性研究

王婷婷¹, 汤云川², 贺莉³, 朱顺熙², 樊战辉², 杨琴^{2*}

(1. 宜宾市生态环境局, 四川 宜宾 644000; 2. 成都市农林科学院, 四川 成都 611130; 3. 农业农村部成都沼气科学研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 为初步探究高粱酒糟与秸秆混合厌氧消化产气特性, 以川糯、泸州红品种的高粱酒糟与秸秆的不同比例混合物为发酵原料, 研究厌氧共消化过程中产气量的变化, 并利用 BP 神经网络分析各组分在所构建模型模拟输入参数和输出产气的关系。结果表明, 添加秸秆有利于酒糟秸秆共消化体系保持产气量的相对稳定, 减少发酵周期, 酒糟: 秸秆比例为 1:3 时, 川糯、泸州红品种的发酵周期分别缩短到 21 d、24 d; 川糯、泸州红酒糟单独厌氧消化时累计产气分别达到 336.96、290.17 mL·g⁻¹TS, 与酒糟秸秆共消化相比更佳; BP 神经网络模型平均误差控制在 10.99%, 表明拟合良好。根据模拟组分的贡献, 发现共消化过程中, 酒糟对累积产甲烷量有更多的贡献。

关键词: 高粱; 酒糟; 秸秆; 厌氧发酵

中图分类号: S216.4; X705; X712 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)02-0023-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023020023

Study on Biogas Production Characteristics of Mixed Anaerobic Digestion of Distilled Grains and Straw / WANG Tingting¹, TANG Yunchuan², HE Li³, ZHU Shunxi², FAN Zhanhui², YANG Qin^{2*} / (1. Yibin Ecological Environment Bureau, Yibin 644000, China; 2. Chengdu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Chengdu 611130, China; 3. Biogas Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to preliminarily explore the gas production characteristics of mixed anaerobic digestion of sorghum distiller's grains and straw, the mixture of sorghum distiller's grains and straw in different proportions of Chuannuo and Luzhouhong varieties was used as fermentation raw material to study the change of gas production during anaerobic co-digestion. The BP neural network were used to study the gas production, and relationship between input parameters and output gas production of each component in the constructed model were analyzed. The results showed that adding straw was beneficial to the co-digestion system of distiller's grains and straw to maintain the relative stability of gas production and reduce the fermentation period. When the ratio of distiller's grains: straw was 1:3, the fermentation period of Chuannuo and Luzhouhong varieties was shortened to 21 d and 24 d, respectively. The cumulative gas production rates of Chuannuo and Luzhou red wine grains were respectively 336.96 and 290.17 mL·g⁻¹TS when anaerobic digestion was performed alone, which was better than that of the co-digestion of distillers grains and straw. The average error of the BP neural network model was controlled at 10.99%, indicating a good fit, according to the contribution of the simulated components. It was found that the distiller's grains contributed more to the cumulative methane production during the co-digestion process.

Key words: sorghum; distiller's grains; straw; anaerobic digestion

随着我国白酒行业不断发展, 产生了数量庞大的酒糟, 同时堆积了大量秸秆废弃物。酒糟是高粱经过发酵、蒸馏出酒后残留的混合固形物, 含有蛋白质、纤维素、淀粉等营养物质^[1]。据估算我国酒糟年产量约 3900 万吨, 高粱秸秆年产量约 6400 万吨, 酒糟和秸秆若处理不当, 不仅严重污染环境, 还会浪费

生物质资源^[2-3]。

厌氧发酵是解决酒糟废弃物的常用方式, 但单一酒糟原料发酵过程中酸化现象严重^[4]。胡伟^[5]等对多粮型白酒酒糟和水稻秸秆厌氧共消化, 发现其具有抑制酸化提升产气的效果。如果利用酒糟与高粱秸秆混合发酵^[6], 既能解决单一酒糟发酵过程

收稿日期: 2022-07-11 修回日期: 2022-10-18

项目来源: 四川省农业减碳与秸秆资源化利用重大技术协同推广项目(JGXT-2022-06; JGXT-2022-07)

作者简介: 王婷婷(1980-), 女, 四川宜宾人, 工程师, 主要从事环境监测、生态分析、环境咨询、环境信息化等工作。

通信作者: 杨琴, E-mail: 423065749@qq.com

中的酸化问题^[7],又能实现秸秆废弃物资源化利用,对缓解能源短缺具有深远意义^[8]。

厌氧消化具有复杂性和非线性特点,对其描述的传统模型仍存在诸多缺点^[9]。人工神经网络能够逼近任意非线性映射,能够适应复杂的成分变化,从而应用于厌氧消化建模。温沁雪^[10]等对猪粪-秸秆厌氧共消化产气构建人工神经网络模型,动量-自适应学习速率算法与厌氧反应器实际值吻合,模拟效果较好。

本研究以高粱酒糟和秸秆为发酵原料,研究厌氧共消化产气特性,分析日产气量和累积产气量变化规律,并利用BP神经网络对其进行模型构建,为酒糟秸秆共消化产气特性提供初步依据,为实践中的调控优化提供参考,实现废弃物资源利用和环境保护^[11]。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验所用的两种高粱川糯、泸州红种植于四川绵竹,川糯是四川省农业科学院水稻高粱研究所

表1 酒糟基础组分信息 (%)

组分	川糯酒糟	泸州红酒糟
总固体(TS)	9.33 ± 0.05	8.55 ± 0.13
挥发性有机物(VS)	95.47 ± 0.23	94.09 ± 0.07
粗蛋白	24.79 ± 0.78	30.52 ± 0.22
粗脂肪	10.24 ± 0.69	13.52 ± 0.35
粗纤维	14.47 ± 1.58	17.06 ± 0.48
残余淀粉	40.02 ± 0.64	24.09 ± 0.04

表3 试验方案

原料品种	川糯					泸州红				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
酒糟: 秸秆	0:1	1:3	1:1	3:1	1:0	0:1	1:3	1:1	3:1	1:0
酒糟进样量/g	0	6	12	18	24	0	6	12	18	24
秸秆进样量/g	24	18	12	6	0	24	18	12	6	0
接种污泥量/g	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
蒸馏水/g	764	764	764	764	764	764	764	764	764	764

1.3 测定的项目及方法

实验装置(见图1)在恒温水浴(35℃)的条件下进行消化产气。每日定时采用排水集气法测量产气量,产气组分使用气相色谱仪进行分析从而得到甲烷产量^[13]。

表2 茎秆基础组分信息 (%)

组分	川糯秸秆	泸州红秸秆
总固体(TS)	90.76 ± 0.14	91.32 ± 0.17
挥发性固体(VS)	88.85 ± 0.23	95.09 ± 0.02
纤维素	17.91 ± 0.60	24.23 ± 0.16
半纤维素	14.63 ± 1.46	15.38 ± 0.07
酸不溶木质素	16.89 ± 0.03	20.86 ± 0.19
酸可溶木质素	3.97 ± 0.07	3.50 ± 0.05
抽提物	32.75 ± 2.10	22.63 ± 1.14

选育的酿酒型杂交高粱品种,泸州红是泸州老窖酿酒的主要原料,两种原料具有普遍代表性。

高粱秸秆经风干后粉碎至1~2 cm待用,籽粒干燥后用于固态消化,收藏酒糟至-4℃冰箱冷冻待用^[12]。实验所用原料基本性状如表1~2所示。

1.2 实验方法

厌氧消化体系进样量设置为800 g,将混合比为1:1、1:3、3:1的酒糟与高粱秸秆,以及单独秸秆、单独酒糟按照基质浓度为30 gTS·kg⁻¹分别加至1 L的锥形瓶中;接种污泥按照15 gTS·kg⁻¹的比例加入到锥形瓶中;设置1组污泥空白实验,用蒸馏水定容至800 g,将底物混合均匀,用橡胶塞封口并连接好导气管,于35℃下恒温培养45 d。每日定时摇晃瓶子,使得瓶子内物料分布均匀,并记录每日的产气量,测定气体中各组分的含量。实验分A、B、C、D、E、F、G、H、I、J共10组,其中A、B、C、D、E使用川糯原料,F、G、H、I、J使用泸州红原料。每个组做2个平行。具体进样方案见表3。

1.4 BP神经网络的构建

BP神经网络作为最成熟的网络结构之一,有很强的自组织、自适应、自学习能力,该网络结构分为3层:输入层、隐藏层和输出层,通过反馈训练达到设定的效果。在其基本结构设计上,本研究以A

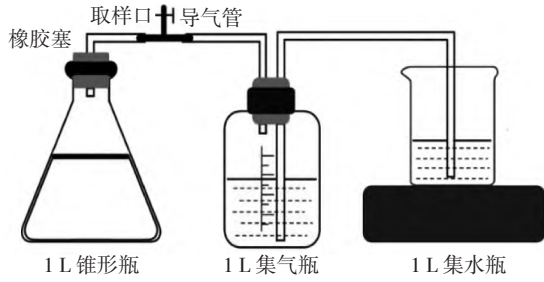


图1 实验装置图

到J共10组所含的纤维素、半纤维素、酸不溶木质素、酸可溶木质素、抽提物、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、残余淀粉的组分含量作为输入层节点,共计9类输入项^[14](见图2)。以各组的累计产甲烷量作为输出层节点,共计1类输出项。隐藏层节点作为BP网络建模中的关键,选取过多会导致冗长的网络训练时间,选取过少则会导致难以达到预期的学习目的。本研究最后采用的是由高大启^[15]在研究中通过最小二乘法所得的拟合简化公式,见公式(1):

$$S = \sqrt{m(n+2)} + 1 \quad (1)$$

式中: S 为隐藏节点数; m 为输入节点数; n 为输出节点数,最终确定本研究采用的隐藏节点数为6。其余各项参数中,激活函数采用 Tanh 函数,计算神经网络的算法采用 Rprop+,训练次数 1000 次,学习速率设定为 0.1,目标误差为 0.02。构建该模型旨在拟合各变量与产甲烷量之间的关系,再此基础上探究酒糟秸秆混合消化过程中各因素的协同响应。以上所有数据采集处理使用 WPS,绘图采用 R 3.4.4(The R Foundation for Statistical Computing),BP 神经网络训练及可视化选取 R 社区发布的 Neuralnet 包^[16],图片内中英文字体渲染使用 R 社区发布的 Showtext 包和 Cairo 开源 2D 图形渲染引擎库。

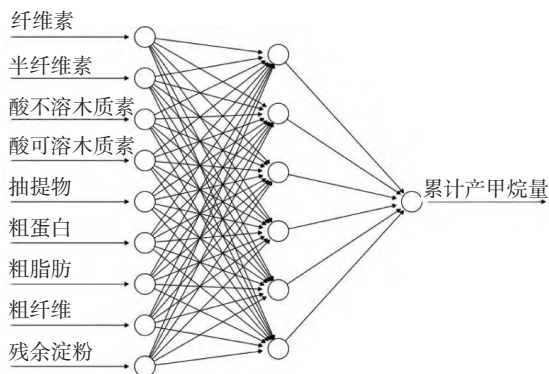


图2 BP神经网络原理示意图

2 结果与分析

2.1 不同混合比对厌氧消化日产气量的影响

为了探究高粱酒糟与秸秆共消化过程中不同混合比对厌氧消化日产气量的影响,本研究通过排水集气法,每天定时采集数据并加以整理,得到不同品种、不同混合比例下各组厌氧消化日产气量如图3所示。

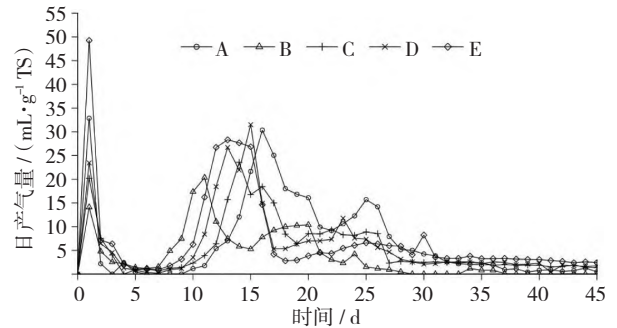


图3 不同处理组日产气量的变化

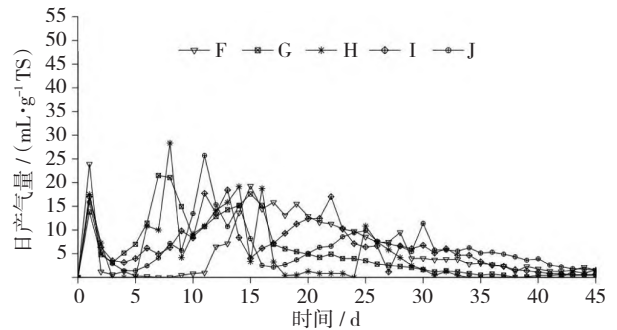


图4 不同处理组日产气量的变化

由图3~4可知,消化初期(开始的3d内),10个处理厌氧消化启动速度均较为迅速,但日产气量差异较大。将A组与F组、B组与G组、C组与H组、D组与I组、E组与J组比较,可以发现不同品种相同酒糟与秸秆比例的情况下,产气的出峰时间接近,产气波动规律相似,但随着酒糟比例的逐渐升高,川糯品种的A、B、C、D、E共5组的日产气性能要优于泸州红品种的F、G、H、I、J这5组,这可能是由于川糯酒糟的营养物质含量要优于泸州红酒糟,因此产气性能更佳,日产气量的表现更好。从整体来看,日产气量的规律都是在第1天形成1个产气高峰,然后下降较长时间后上升达到第2个高峰,最后下降较短时间后上升达到第3个高峰,之后保持下降并趋于低性能的日产气,整个过程形成3个高峰,但各组出现高峰的时间不一。出现第1个高峰

的原因是发酵初期各组内的有机物被微生物迅速利用大量产气,随着有机物的迅速减少和发酵系统出现酸化现象,日产气量也随之减少^[17]。在这之后,由于各组内酒糟和秸秆的品种、比例不同,因此,一些有机成分被水解利用的时间也不同,日产气性能也随之发生变化,导致各组出现第2个和第3个高峰的时间也不尽相同^[18]。

2.2 不同混合比对厌氧消化过程中累计产气量的影响

为了探究高粱酒糟与秸秆共消化过程中不同混合比对厌氧消化累计产气量的影响,本研究通过整理日产气量数据,得到不同品种、不同混合比例下各组厌氧消化累计产气量如图5~6所示。

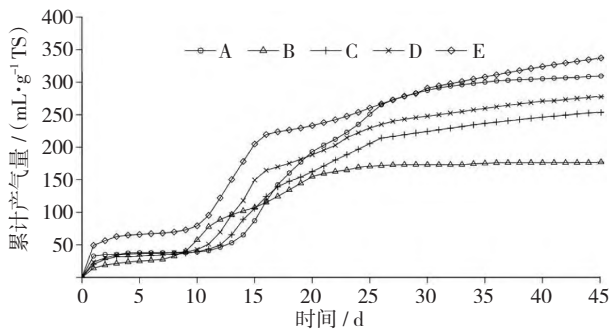


图5 不同处理组累积产气量的变化

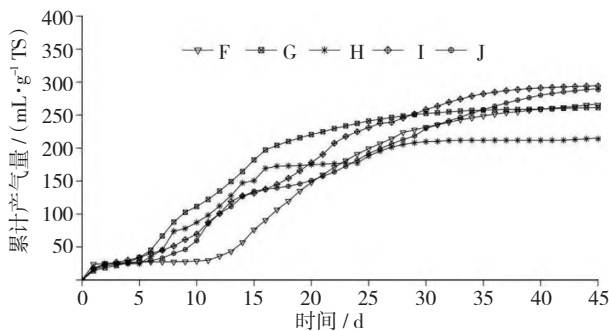


图6 不同处理组累积产气量的变化

由图5~6可知,川糯实验组中,45 d 累积产气量由高到低依次为 E > A > D > C > B, 累计产气量依次为 336.96、309.17、278.41、254.01、176.26 mL·g⁻¹TS, 单独添加川糯秸秆、酒糟的 A、E 两组产气量要高于川糯秸秆与酒糟共消化的 B、C、D 3 组, 其中 A 较 D、C、B 分别高出 30.76、55.16、132.91 mL·g⁻¹TS, E 较 D、C、B 分别高出 58.55、82.95、160.7 mL·g⁻¹TS; 在泸州红试验组中,45 d 累积产气量由高到低依次为 I > J > F > G > H, 累计产气量依次为 294.68、290.17、266.85、261.64、215.5

mL·g⁻¹TS, 单独添加泸州红秸秆、酒糟的 F、J 两组产气量仅次于 I 组, 分别低于 I 组 27.83、4.51 mL·g⁻¹TS, F、J 两组优于 G、H 两组, F 较 G、H 两组高出 5.21、51.35 mL·g⁻¹TS, J 较 G、H 两组高出 28.53、74.67 mL·g⁻¹TS。从不同品种观察各酒糟秸秆混合比例对累积产气率的影响,可以发现单一酒糟或单一秸秆厌氧消化要普遍优于酒糟秸秆混合发酵,这可能是由于酒糟秸秆在混合发酵的过程中滞留时间有所延长,由此增加了体系中微生物适应底物的时间,导致共消化体系的产气量下降。将不同品种相同酒糟秸秆比例的组别进行比较,发现 A 组较 F 组高出 42.32 mL·g⁻¹TS, B 组较 G 组低出 85.38 mL·g⁻¹TS, C 组较 H 组高出 38.51 mL·g⁻¹TS, D 组较 I 组低出 16.27 mL·g⁻¹TS, E 组较 J 组高出 46.79 mL·g⁻¹TS, 总的来说川糯品种的组别略优于泸州红品种的组别。这可能是因为川糯秸秆与泸州红秸秆营养物质组分含量接近,但川糯酒糟的营养物质含量要优于泸州红酒糟,因此川糯组的产气性能更好,累积产气量更大。

一般在实际生产中,当累积产气量达到总产气量的90%以上为1个发酵周期,即厌氧发酵基本完成,由此得出 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 组处理的厌氧发酵周期依次为 28、21、32、32、34、33、24、26、32、36 d。在川糯的实验组中,单独添加酒糟的 E 组与 A、B、C、D 组相比,其发酵周期分别延长了 6、13、2、2 d; 在泸州红的实验组中也可以观察到相似的结论,单独添加酒糟的 J 组较 F、G、H、I 组相比,发酵周期分别延长了 3、12、10、4 d; 综合来看,当酒糟:秸秆比例为 1:3 时,其发酵周期与单一酒糟发酵相比大幅度缩短。厌氧发酵周期的长短与发酵原料成分有一定关系,同时也能反映发酵原料降解的难易程度,由实验数据推算的发酵周期可以得出,共消化系统中的降解难度要低于单一酒糟发酵,这可能是由于共消化体系中秸秆起到了调节 pH 值的作用,避免了酸化现象^[19],使得微生物能有较为稳定的环境,共消化系统中的秸秆、酒糟水解速度也因此加快,缩短了整个厌氧发酵周期。

2.3 利用神经网络分析部分组分与甲烷产量之间的关系

本实验在温度 35℃ 的条件下进行中温厌氧发酵,通过每日采集气体并利用气相色谱仪分析其中组分含量,最终经计算得 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 组

的累积产甲烷量为 154. 40、94. 89、137. 35、154. 07、175. 71、137. 62、147. 75、131. 48、159. 91、167. 51 mL·g⁻¹TS。利用图 2 中的 BP 神经网络模型,依照设定将规定的组分信息、甲烷累积产量输入节点。模型训练完成后,以各样本组分数据作为输入层数据得到相应的拟合值,最终得到各组的相对误差情况(见表 4)。由表 4 可知除 B 组外,真实值与预测值的拟合情况都相对较好。以每组的真实值与预测值为依据,计算出相对误差的平均值为 10. 99%。

表 4 实验组真实值与拟合值的相对误差

(mL·g⁻¹)

项目	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
真实值	154. 40	94. 89	137. 35	154. 07	175. 71	137. 62	147. 75	131. 48	159. 91	167. 51
拟合值	145. 94	132. 16	145. 47	162. 67	149. 81	146. 00	151. 49	145. 34	146. 67	155. 30
误差	8. 46	-37. 27	-8. 12	-8. 60	25. 90	-8. 38	-3. 74	-13. 86	13. 24	12. 21
相对误差/%	5. 79	39. 28	5. 91	5. 58	17. 29	6. 09	2. 53	10. 54	9. 03	7. 86

在拟合效果可靠的基础上,通过泛化权值可视化,可以对各协变量与产甲烷量之间的关系进行探究。由各协同变量泛化权值图(见图 7~15)可知所有泛化值(纵坐标)都接近于 0,说明各协变量对分类结果影响不大。从协同响应值(横坐标)的重合情况来看,考虑到横坐标的大小取值,可以发现添加比例相同的情况下川糯、泸州红秸秆的响应值极度接近,而川糯、泸州红酒糟则在添加比例相同的情况下更多呈现出分离现象。这是由于两个品种秸秆中组分含量接近且组分含量本身就较少;两个品种的酒糟则不同,即使是含量接近的组分,由于组分本身含量大也就拉开了响应值的差异。从协同响应值的大小来看,在酒糟秸秆的混合发酵体系中,单就茎秆而言,除酸可溶木质素以外其余组分均发挥了一定作用;在酒糟中则是粗蛋白和残余淀粉提供了较大

就其拟合情况而言,10 组中有 9 组的相对误差水平控制在 20% 以内,有 8 组的误差控制在平均相对误差水平以下,只有 B 组的相对误差达到了 39. 28%。这可能是因为偶然原因导致了 B 组产甲烷量下降,单独观察实验中 10 组累积产甲烷量的数据,会发现 B 组产气量确实在某种程度上偏离了整体水平。就总体而言,仅以 10 组数据进行 BP 神经网络数据拟合,拟合情况依然控制在了相对误差的平均值为 10. 99% 的水平,其拟合效果依然较好。

的响应值;从协同响应的总体情况来看,酒糟的响应值贡献程度远远高于秸秆,由此可知,在 BP 神经网络

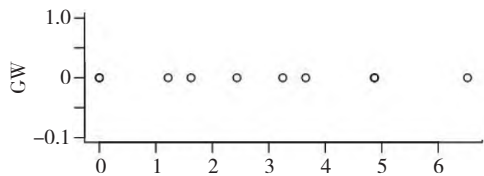


图 7 纤维素(秸秆)泛化权值图

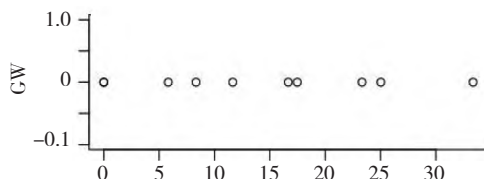


图 8 粗蛋白(酒糟)泛化权值图

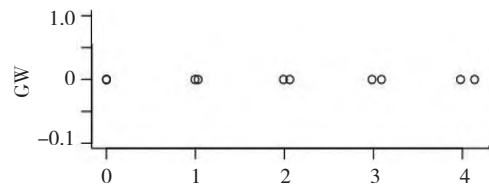


图 9 半纤维素(秸秆)泛化权值图

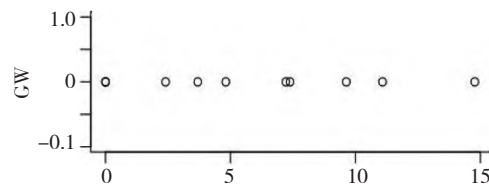


图 10 粗脂肪(酒糟)泛化权值图

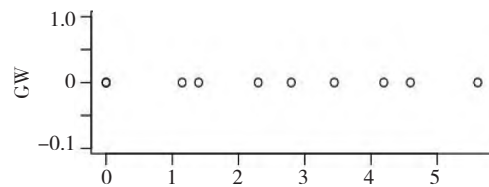


图 11 酸不溶木质素(秸秆)泛化权值图

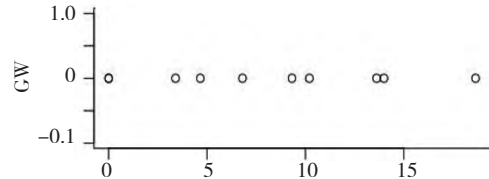


图 12 粗纤维(酒糟)泛化权值图

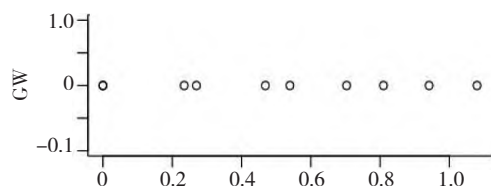


图 13 酸可溶木质素(秸秆)泛化权值图

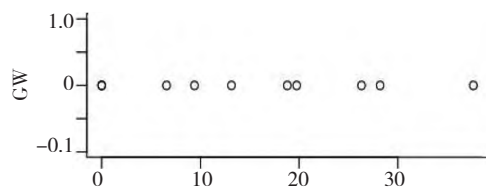


图 14 残余淀粉(酒糟)泛化权值图

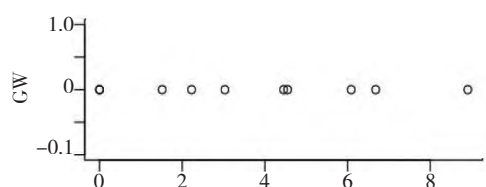


图 15 抽提物(秸秆)泛化权值图

络拟合的酒糟秸秆混合发酵模型中,酒糟的含量相较秸秆而言对累积产甲烷量有更重要的贡献。在实验数据中,单一酒糟的发酵产气量要优于单一秸秆发酵,也为这一结论提供了有利证据。

3 结论

(1) 将高粱秸秆和酒糟混合厌氧消化,有利于保持日产气量的相对稳定,并缩短发酵周期,当酒糟:秸秆为1:3时,川糯和泸州红高粱品种的厌氧消化周期分别缩短至21 d和24 d。

(2) 就累积产气量而言,不同品种高粱的单一酒糟或单一秸秆厌氧消化普遍优于酒糟和秸秆共消化。

(3) 在验证BP神经网络的拟合效果可靠的情况下,利用BP神经网络系统内部的协同变量响应值分析工具,可以推测出在酒糟秸秆混合厌氧消化体系中,酒糟对累积产甲烷量有更重要的贡献。

综上所述,如果希望保持日产气量的相对稳定并减少发酵周期的天数,可考虑酒糟与秸秆进行混合厌氧消化;如果希望获得较高的沼气产量,可考虑单一酒糟或单一秸秆厌氧消化。

参考文献:

[1] 张丽华,王小媛,李昌文,等.酒糟再利用的研究进展[J].食品与发酵工业,2017,43(11):250-256.

[2] 左上春,杨海泉,邹伟.白酒酒糟资源化利用研究进展[J].食品工业,2016,37(1):246-249.

[3] 文武.国内甜高粱秸秆渣的加工利用现状分析[J].中国甜菜糖业,2018,39(4):41-42.

[4] 李芳香,郝建平.酒糟的保存和应用现状[J].山地农业生物学报,2016,35(04):66-71.

[5] 胡伟,陈豫.多粮型白酒酒糟与水稻秸秆混合厌氧发酵产沼特性研究[J].食品与发酵工业,2014,40(12):19-23.

[6] 刘天天,毕升阁,惠丰立,等.木薯酒糟两相和单相厌氧发酵性能比较[J].现代化工,2018,38(06):175-178.

[7] 陈承峰,邓铭俊.高浓度酒糟废水厌氧发酵产沼气条件研究[J].广东化工,2018,45(23):7-9.

[8] 张文贞.国内甜高粱秸秆渣的循环化利用模式展望[J].中国甜菜糖业,2018,40(003):35-37.

[9] 冯晶,赵立欣,姚宗路,等.稻壳鸭粪混合物料厌氧消化产沼模型研究[J].环境科学与技术,2016,39(S2):232-236.

[10] 温沁雪,李奕芯,杨硕,等.基于数据挖掘和人工神经网络的厌氧产气模型构建[J].中国给水排水,2019,35(01):77-81.

[11] 郭传广,何松贵,卫云路.酒糟能源开发利用研究[J].酿酒,2017,44(04):99-102.

[12] 李洪飞,孙大庆,曹龙奎.高粱秸秆预处理方法的研究进展[J].安徽农学通报,2018,24(09):93-95.

[13] 王太涛,赵龙,张盼,等.酒糟沼气发酵的基础探究[J].中国沼气,2017,35(01):60-62.

[14] 李佟,李军.基于数据挖掘技术的污泥厌氧消化模拟研究[J].北京工业大学学报,2016,42(12):128-134.

[15] 高大启.有教师的线性基本函数前向三层神经网络结构研究[J].电路与系统学报,1997,21(3):31-37.

[16] Günther F, Fritsch S. Training of neural networks[J]. The R journal 2010,2(1):30-38.

[17] Ahmad B, Yadav V, Yadav A, et al. Integrated biorefinery approach to valorize winery waste: A review from waste to energy perspectives[J]. Science of The Total Environment 2020,71(9):135-142.

[18] 郭婷,徐帅,吕孝宇.秸秆-酒糟混合液厌氧发酵产沼气的初步研究[J].食品工业科技,2010,31(008):248-250.

[19] 毕升阁,王林风,闫德冉,等.黄贮玉米秸秆厌氧发酵产沼气试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(17):133-138.