

引用格式:师杨蕾,蔡凡凡,宁志芳,等. 碱性过氧化氢预处理对醋渣厌氧消化性能的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(1):1-7.

SHI YangLei, CAI FanFan, NING ZhiFang, et al. Impact of alkaline hydrogen peroxide pretreatment on the anaerobic digestion of vinegar residues[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020,47(1):1-7.

# 碱性过氧化氢预处理对醋渣厌氧消化性能的影响

师杨蕾 蔡凡凡 宁志芳 朱哲 刘广青\* 陈畅\*

(北京化工大学 化学工程学院,北京 100029)

**摘要:**利用单因素法研究了碱性过氧化氢预处理过程中的  $H_2O_2$  浓度、预处理温度以及预处理时间 3 个因素对醋渣厌氧消化性能的影响,结果表明, $H_2O_2$  浓度、预处理温度和预处理时间的最优条件分别为 4%、40℃ 和 12 h。经实验验证,在最佳联合预处理条件下醋渣厌氧消化累积甲烷产量(基于挥发性固体含量)达 302.0 mL/g,生物降解率为 70.0%,较未预处理醋渣提升了 54.4%。

**关键词:**醋渣;碱性过氧化氢预处理;厌氧消化;产甲烷性能

**中图分类号:** X797 **DOI:** 10.13543/j.bhxbr.2020.01.001

## 引言

醋渣(vinegar residue, VR)是工业制醋的主要副产物,我国每年醋渣产生量超过 300 万吨<sup>[1]</sup>。醋渣中水分含量较高,不利于直接焚烧处理,同时还具有一定的酸性和腐蚀性,直接填埋会造成土壤与水质污染。醋渣主要成分为麸皮、稻壳等,木质纤维素含量占其干重的 60% 以上,同时含有少量的粗蛋白及粗脂肪<sup>[2]</sup>。目前,醋渣主要用于生产无土栽培基质、饲料、肥料等<sup>[2-4]</sup>。宋夏夏<sup>[4]</sup>将醋渣与蛭石、草炭按一定比例混合配制水果型黄瓜的无土栽培基质,有效提升了产量与果实品质。然而,以上方法成本较高,处理量小,无法大批量处理醋渣,不足以解决醋渣造成的环境污染问题,因此还需探索更加高效的醋渣处理和利用关键技术。

厌氧消化指微生物在厌氧条件下,利用环境中的糖类、蛋白质等有机物,合成自身生命活动所需物质,同时生成甲烷、氢气和二氧化碳的过程<sup>[5]</sup>。该

技术成本较低,可以将醋渣转化为沼气等清洁能源,从而实现醋渣减量化和资源化处理<sup>[6-7]</sup>。然而,醋渣中富含的木质纤维素为木质素包裹纤维素和半纤维素,并相互间作用形成致密结构,该结构在厌氧消化中难以被微生物快速分解利用<sup>[8]</sup>。预处理技术是改善木质纤维素生物降解能力的一种重要手段,目前常用的预处理技术包括物理预处理、化学预处理、生物预处理等<sup>[9-10]</sup>。近年来,因兼具碱性和氧化性,碱性过氧化氢(alkaline hydrogen peroxide, AHP)预处理被认为是一种高效、经济且环保的预处理技术<sup>[11]</sup>。黄炳硕等<sup>[11]</sup>利用 AHP 预处理稻草秸秆,发现稻秆的纤维素结晶度和木质素含量均有所下降,并促进了随后的酶水解过程。然而,当前利用 AHP 预处理醋渣的相关研究较少。

本文以醋渣为厌氧消化底物,研究  $H_2O_2$  浓度、预处理温度、预处理时间 3 个因素对 AHP 预处理效果的影响,确定了最佳的 AHP 预处理条件以及醋渣的最大甲烷产量。

## 1 实验部分

### 1.1 原料与接种物

醋渣取自山西晋城某制醋厂,保存于 4℃ 冰箱中以防变质。接种物取自北京市东华山沼气站的中温(35℃)厌氧活性污泥,静置沉降后取下层使用。醋渣和接种物的性质分析结果见表 1。

收稿日期:2019-05-24

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0800801)

第一作者:女,1993 年生,硕士生

\* 通信联系人

E-mail: gqliu@mail.buct.edu.cn; chenchang@mail.buct.edu.cn

表1 醋渣与接种物性质

Table 1 Characteristics of VR and inoculum

参数	数值	
	醋渣	污泥
TS 含量 <sup>a)</sup> /%	98.80 ± 0.05	6.35 ± 0.01
VS 含量 <sup>a)</sup> /%	91.99 ± 0.03	4.01 ± 0.01
VS/TS 含量比值/%	93.11 ± 0.07	63.12 ± 0.05
C 含量 <sup>b)</sup> /%	47.01	2.71
H 含量 <sup>b)</sup> /%	6.03	27.01
N 含量 <sup>b)</sup> /%	4.21	3.98
S 含量 <sup>b)</sup> /%	0.21	0.57
O 含量 <sup>b)</sup> /%	35.39	NA
纤维素含量 <sup>c)</sup> /%	52.65 ± 1.92	NA
半纤维素含量 <sup>c)</sup> /%	31.82 ± 0.80	NA
木质素含量 <sup>c)</sup> /%	10.08 ± 1.61	NA
TMMY/(mL·g <sup>-1</sup> )	431.8	NA

a—以样本总重为基准;b—以样本干重为基准;c—以样本挥发性固体含量为基准;TS—总固体;VS—挥发性固体;NA—未分析;TMMY—最大理论甲烷产量。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 醋渣碱性过氧化氢预处理实验

碱性过氧化氢预处理操作方法为:将质量分数30%的过氧化氢溶液与一定量水混合,加入醋渣,控制预处理系统的含水率为90%,调节pH为11.5,含水率计算公式如式(1)所示<sup>[12]</sup>,所有预处理均在1L塑料盒中进行。

$$M_c = \left(1 - \frac{m_0}{m_1 + m_2 + m_3}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, $M_c$ 为预处理系统含水率,%; $m_0$ 为醋渣干重,g; $m_1$ 为醋渣总重,g; $m_2$ 为过氧化氢溶液质量,g; $m_3$ 为添加水的质量,g。

### 1.2.2 单因素实验

本文采用单因素法研究了过氧化氢浓度、预处理温度和预处理时间这3个因素对AHP预处理效果的影响,3个因素的水平条件设计如表2所示。

表2 各因素选取的不同水平

Table 2 Levels of single factors

因素水平	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 浓度/%	温度/℃	时间/h
1	2	25	6
2	3	35	12
3	4	45	18
4	5	55	24

### 1.2.3 厌氧消化实验

实验进料有机负荷为10 g/L(基于VS),醋渣与接种物之比(基于VS)为1,每组设两个平行,同时设置两个不含醋渣的纯污泥对照空白组。首先,将醋渣和接种物依次加入500 mL厌氧消化反应器中,加水至工作体积为200 mL,用0.1 MPa的纯氮气吹扫约3 min以排尽反应器中的氧气,将密封的反应器放置在37℃恒温培养箱中厌氧消化35 d。

### 1.2.4 分析方法

总固体(total solid, TS)和挥发性固体(volatile solid, VS)含量通过美国公共卫生协会(APHA)标准方法测定<sup>[13]</sup>。C、H、N、S元素的含量(基于TS)由元素分析仪(Vario EL cube,德国Elementar Analysensysteme GmbH公司)测得;O元素含量根据C、N、H、O元素含量之和为99.5%(基于VS)计算得出<sup>[14]</sup>。纤维素、半纤维素和木质素含量参考Van Soest方法<sup>[15]</sup>采用纤维素分析仪(ANKOM 2000,美国ANKOM公司)测定。反应器内压力用压力计(3151WAL-BMP-Test,德国WAL Messund Regelsysteme GmbH公司)测得,并根据式(2)计算沼气产量<sup>[16]</sup>。

$$V_{\text{biogas}} = \frac{\Delta p V_{\text{head}} C}{RT} \quad (2)$$

式中, $V_{\text{biogas}}$ 为每日沼气产量,mL; $\Delta p$ 为厌氧反应器放气前后两次测得的压力差,kPa; $V_{\text{head}}$ 为厌氧反应器中顶空体积,L; $C$ 为摩尔体积,22.41 L/mol; $R$ 为理想气体常数,8.314 kPa/(K·mol); $T$ 为绝对温度,K。沼气中甲烷含量由装有热导检测器(thermal conductivity detector, TCD)的气相色谱仪(Agilent 7890B,美国Agilent公司)测定<sup>[17]</sup>。

预处理前后醋渣的化学结构变化由Nicolet 6700傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)(美国Nicolet公司)测定,波数范围400~4 000 cm<sup>-1</sup>。预处理前后醋渣纤维素结晶度变化由D8 ADVANCE衍射仪(德国Bruker AXS公司)在40 kV、40 mA条件下进行X-射线衍射分析(X-ray diffraction, XRD)得到,扫描角度5°~60°。纤维素的结晶度指数 $R$ 由式(3)计算得出<sup>[18]</sup>。

$$R = \frac{I_{002} - I_{\text{AM}}}{I_{002}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $I_{002}$ 为002面最大衍射强度; $I_{\text{AM}}$ 为衍射角 $2\theta = 18^\circ$ 时的衍射强度,即无定形区衍射强度。

### 1.2.5 动力学分析

采用修正的 Gompertz 模型(式(4))、Cone 模型(式(5))和一阶动力学模型(式(6))对厌氧消化产甲烷过程进行动力学分析<sup>[16]</sup>。

$$B = B_0 \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{\mu_m e}{B_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (4)$$

$$B = \frac{B_0}{1 + (kt)^{-n}} \quad (5)$$

$$B = B_0 [1 - \exp(-kt)] \quad (6)$$

式中,  $B$  为拟合的累积甲烷产量, mL/g (基于 VS, 下同);  $B_0$  为拟合的最大甲烷产量, mL/g;  $\mu_m$  为最大甲烷产率, mL/(g·d);  $\lambda$  为产甲烷停滞期, d;  $k$  为水解速率常数, d<sup>-1</sup>;  $t$  为反应时间, d。

## 2 结果分析

### 2.1 甲烷产量影响因素及条件优化

#### 2.1.1 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度

图 1 为不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度时, AHP 预处理后醋渣的累积甲烷产量 (CMY)。从图中可以看出, 未预处理醋渣的累积甲烷产量为 195.6 mL/g, 并计算得到其生物降解率为 45.3%<sup>[18]</sup>。经不同浓度 AHP 预处理后, 醋渣厌氧消化累积甲烷产量和生物降解率均显著提升 ( $p < 0.01$ ), 且随着 AHP 预处理浓度的增加, 提升效果逐渐增强。然而, 表 3 的差异性分析结果表明, 4% 和 5% AHP 预处理后, 醋渣累积甲烷产量之间并无显著性差异 ( $p > 0.05$ ), 因此认为 4% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 是 AHP 预处理的最佳浓度条件。此条件下, 醋渣厌氧消化累积甲烷产量为 267.9 mL/g, 生物降解率提升至 62.0%, 与未预处理相比提高了 37.0%。

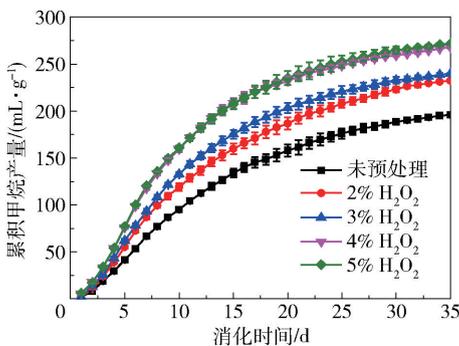


图 1 不同浓度条件下 AHP 预处理后醋渣的累积甲烷产量

Fig. 1 CMY of VR after AHP pretreatment with different concentrations

#### 2.1.2 预处理温度

图 2 为不同预处理温度下醋渣厌氧消化甲烷产

表 3 不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度下累积甲烷产量显著性差异分析

Table 3 Statistical analysis of the CMY of AHP pretreated VR with different H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations

实验组	差异性分析结果				
	未预处理	2% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	3% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
未预处理	-	N. S.	S.	V. S.	V. S.
2% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	N. S.	-	S.	S.	S.
3% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	S.	S.	-	N. S.	N. S.
4% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	V. S.	S.	N. S.	-	N. S.
5% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	V. S.	S.	N. S.	N. S.	-

N. S. —非显著性差异 ( $p > 0.05$ ); S. —显著性差异 ( $p < 0.05$ ); V. S. —极显著性差异 ( $p < 0.01$ )。

量的变化趋势。可以看出, 随着预处理温度升高, 醋渣厌氧消化的累积甲烷产量先升高后下降。当预处理温度为 40 °C 时, 累积甲烷产量最高, 达 280.9 mL/g, 生物降解率高达 65.0%, 相比未预处理提升了 43.6%。差异性分析结果(表 4)表明, 此条件下累积甲烷产量与未预处理累积甲烷产量之间存在极显著性差异 ( $p < 0.01$ )。而当预处理温度升高至 50 °C

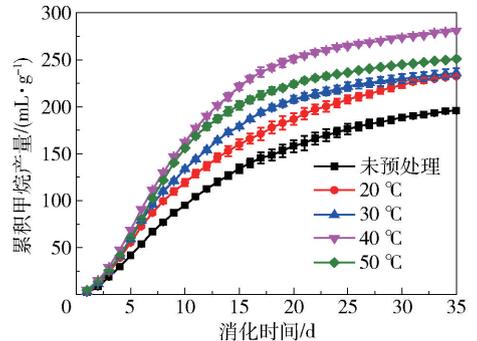


图 2 不同温度条件下 AHP 预处理后醋渣的累积甲烷产量

Fig. 2 CMY of VR after AHP pretreatment at different temperatures

表 4 不同预处理温度下醋渣累积甲烷产量显著性差异分析

Table 4 Statistical analysis of the CMY of AHP pretreated VR at different pretreating temperatures

实验组	差异性分析结果				
	未预处理	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
未预处理	-	N. S.	S.	V. S.	V. S.
20 °C	N. S.	-	N. S.	S.	N. S.
30 °C	S.	N. S.	-	N. S.	N. S.
40 °C	V. S.	S.	N. S.	-	N. S.
50 °C	V. S.	N. S.	N. S.	N. S.	-

N. S. —非显著性差异 ( $p > 0.05$ ); S. —显著性差异 ( $p < 0.05$ ); V. S. —极显著性差异 ( $p < 0.01$ )。

时,累积甲烷产量降低,这可能是因为  $H_2O_2$  在高温条件下不稳定、易分解,导致预处理效果较差。

### 2.1.3 预处理时间

不同预处理时间下,甲烷产量变化趋势如图3所示。预处理时间为12 h时,累积甲烷产量最高,为265.9 mL/g,生物降解率为61.6%,相比未预处理提升了35.9%。另外从表5可以看出,12 h预处理与6 h预处理和未预处理相比,均存在极显著性差异( $p < 0.01$ )。而当预处理时间提升至18 h和24 h时,累积甲烷产量较12 h均降低,说明AHP预处理的主要作用时间在6~12 h,而延长预处理时间可能会造成有机质流失,导致累积甲烷产量减少。Zhang等<sup>[18]</sup>对AHP预处理棉花秸秆的浸出液成分分析发现,随着预处理时间的延长,预处理浸出液中可溶性糖和蛋白质等有机组分含量明显升高,该发现与本文实验结论一致。

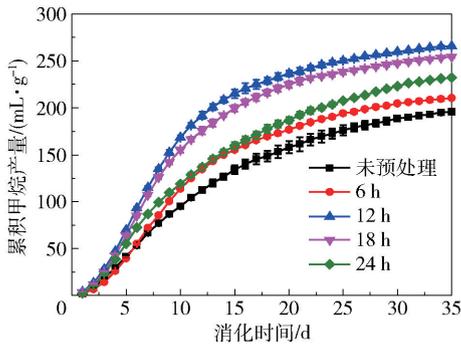


图3 不同AHP预处理时间下醋渣的累积甲烷产量  
Fig. 3 CMY of VR after AHP pretreatment for different times

表5 不同预处理时间下醋渣厌氧消化累积甲烷产量显著性差异分析

Table 5 Statistical analysis of the CMY of AHP pretreated VR with different pretreating times

实验组	差异性分析结果				
	未预处理	6 h	12 h	18 h	24 h
未预处理	-	N. S.	V. S.	V. S.	N. S.
6 h	N. S.	-	V. S.	S.	N. S.
12 h	V. S.	V. S.	-	N. S.	S.
18 h	V. S.	S.	N. S.	-	N. S.
24 h	N. S.	N. S.	S.	N. S.	-

N. S.—非显著性差异 ( $p > 0.05$ ); S.—显著性差异 ( $p < 0.05$ ); V. S.—极显著性差异 ( $p < 0.01$ )。

### 2.1.4 AHP 预处理条件优化

AHP最佳预处理条件下(4%  $H_2O_2/40^\circ C/12h$ )醋渣的累积甲烷产量如图4所示。从图中可以看

出,此条件下预处理后醋渣的厌氧消化产甲烷性能显著提升,累积甲烷产量为302.0 mL/g,生物降解率提升至70.0%,较未预处理提升了54.4%。最佳条件下预处理后的醋渣累积甲烷产量相较于4%  $H_2O_2$ 浓度以及12 h预处理时间等单因素最优条件,均有显著性提升( $p < 0.05$ ),说明4%  $H_2O_2/40^\circ C/12h$ 的最佳预处理条件对醋渣累积甲烷产量的提升效果更好。

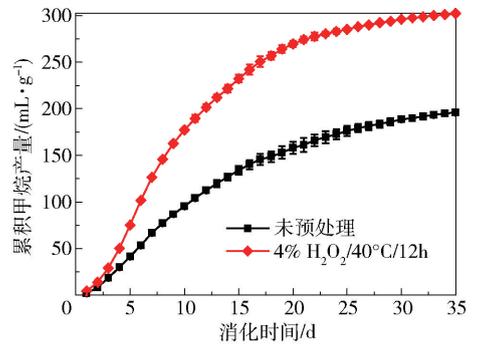


图4 最佳AHP预处理条件下醋渣厌氧消化累积甲烷产量  
Fig. 4 CMY of AHP pretreated VR under the optimal condition

## 2.2 预处理前后木质纤维素变化

### 2.2.1 木质纤维素含量

AHP预处理前后醋渣的木质纤维素含量见表6。可以看出,不同条件下预处理后木质纤维素组分均发生了明显变化。预处理后醋渣的木质素含量均低于未预处理,说明木质素被有效去除,纤维素与半

表6 预处理前后醋渣木质纤维素含量

Table 6 Lignocellulosic composition of untreated and pretreated VR

实验组	含量*/%		
	纤维素	半纤维素	木质素
未处理	52.7 ± 1.9	31.8 ± 0.8	10.1 ± 1.6
2% $H_2O_2$	50.2 ± 3.8	23.3 ± 0.3	7.8 ± 1.7
3% $H_2O_2$	54.8 ± 3.5	22.0 ± 0.4	6.9 ± 1.8
4% $H_2O_2$	53.0 ± 0.6	21.7 ± 0.4	5.7 ± 0.6
5% $H_2O_2$	50.7 ± 3.6	19.0 ± 0.6	6.4 ± 0.9
30 °C	53.0 ± 3.2	23.0 ± 0.3	7.1 ± 0.3
40 °C	48.6 ± 2.2	20.4 ± 0.9	6.4 ± 0.8
50 °C	52.6 ± 4.1	21.7 ± 0.2	7.1 ± 1.0
6 h	50.6 ± 5.1	27.7 ± 0.1	11.2 ± 0.4
12 h	49.3 ± 1.1	25.0 ± 0.2	8.5 ± 1.4
18 h	44.8 ± 5.0	23.6 ± 0.1	8.0 ± 0.6
4% $H_2O_2/40^\circ C/12h$	46.5 ± 0.3	13.7 ± 0.2	5.4 ± 0.1

\*以样本 VS 为基准。

纤维素暴露出来,更易于被微生物利用;预处理后半纤维素含量也有所降低,说明半纤维素在 AHP 溶液中部分溶出并降解。其中,4%  $H_2O_2/40\text{ }^\circ\text{C}/12\text{ h}$  条件下预处理对木质素和半纤维素的降解效果最为明显,木质素的去除率为 46.5%,半纤维素的降解率为 56.9%。

### 2.2.2 木质纤维素结构

利用 XRD 和 FT-IR 对未预处理以及 4%  $H_2O_2/40\text{ }^\circ\text{C}/12\text{ h}$  预处理后醋渣的物理化学结构进行分析。根据图 5 的 XRD 图谱以及式(3)计算可得,未预处理醋渣的纤维素结晶度指数为 43.5%,预处理后醋渣的纤维素结晶度指数降低为 34.7%,说明纤维素的非晶型结构所占比例上升,纤维素可及性增加。

预处理前后醋渣的 FT-IR 谱图如图 6 所示。可以看出,AHP 预处理后,各特征峰的透过率降低。其中,纤维素及半纤维素与木质素连接的酯键对应于  $1166\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰在预处理后减弱,说明 AHP 预处理打破了木质素包裹纤维素和半纤维素的致密结构; $3425\text{ cm}^{-1}$  处对应于羟基伸缩振动峰,该峰经 AHP 预处理后明显减弱,说明木质纤维素结构中的氢键遭到破坏,纤维素结晶区被破坏。

木质纤维素含量变化以及结构表征分析结果表明,预处理后醋渣的纤维素结晶度下降,纤维素可及性增大,半纤维素和木质素被部分降解或破坏。

### 2.3 动力学模型拟合

对  $H_2O_2$  浓度、预处理温度、预处理时间 3 个因

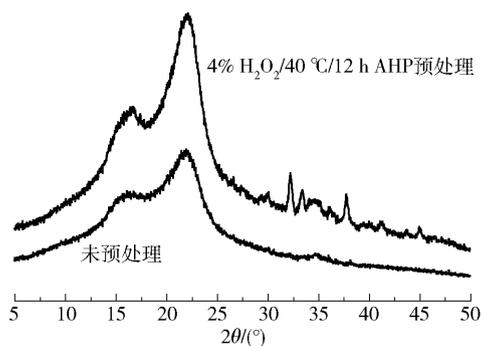


图 5 XRD 谱图

Fig. 5 XRD patterns

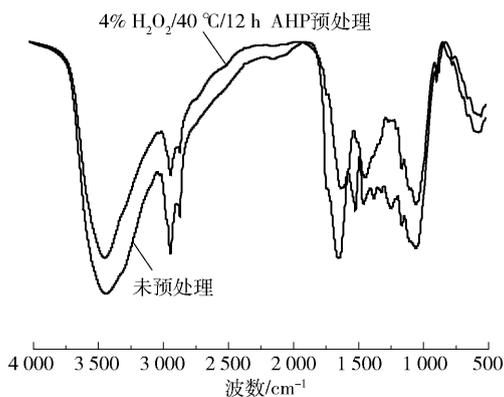


图 6 FT-IR 谱图

Fig. 6 FT-IR spectra

素的优化条件以及 4%  $H_2O_2/40\text{ }^\circ\text{C}/12\text{ h}$  预处理条件下醋渣厌氧消化产甲烷过程进行了动力学分析,拟合结果如表 7 所示。可以看出,修正的 Gompertz 模型和 Cone 模型拟合所得的  $R^2$  明显高于一阶动力学模型,说明修正的 Gompertz 模型和 Cone 模型更适用于拟合预处理醋渣的厌氧消化产甲烷过程。

表 7 修正的 Gompertz 模型、Cone 模型和一阶动力学模型分析

Table 7 Kinetic analysis with modified Gompertz, Cone, and First-order models

实验组	CMY/ ( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	BD/ %	提升 率/ %	修正 Gompertz 模型				Cone 模型			一阶动力学模型		
				$B_0$ / ( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\mu_m$ / ( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$\lambda/\text{d}^{-1}$	$R^2$	$B_0$ / ( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$k/\text{d}^{-1}$	$R^2$	$B_0$ / ( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$k/\text{d}^{-1}$	$R^2$
未预处理	195.6	45.3	-	191.7	13.88	2.577	0.992	204.3	0.115	0.997	217.6	0.075	0.970
4%/20 $^\circ\text{C}$ /24 h	267.9	62.0	37.0	263.3	23.57	1.150	0.993	274.9	0.148	0.996	281.6	0.106	0.968
2%/40 $^\circ\text{C}$ /24 h	280.9	65.0	43.6	279.9	24.07	1.628	0.992	292.6	0.133	0.998	307.1	0.092	0.963
2%/20 $^\circ\text{C}$ /12 h	265.9	61.6	35.9	270.8	24.10	2.168	0.994	280.3	0.128	0.997	301.6	0.086	0.951
4%/40 $^\circ\text{C}$ /12 h	302.0	70.0	54.6	302.7	25.0	1.030	0.995	316.1	0.152	0.998	340.4	0.081	0.958

$B_0$ —拟合的最大甲烷产量; $\mu_m$ —最大甲烷产率; $\lambda$ —迟滞期; $R^2$ —相关性系数;CMY—累积甲烷产量;BD—生物降解率,CMY 与 TMMY 的比值,TMMY 取  $431.9\text{ mL/g}$ ;  $k$ —水解速率常数。

基于修正的 Gompertz 模型拟合结果,迟滞期和最大甲烷产率共同反映微生物对底物的水解速率。

一般而言,迟滞期越短,最大甲烷产率越大,水解速率也越大<sup>[17]</sup>。从表 7 可以看出,预处理有效降低了

反应迟滞期,提升了最大甲烷产率。其中,4%  $\text{H}_2\text{O}_2$ /40  $^\circ\text{C}$ /12 h 预处理条件下的迟滞期最短,最大甲烷产率最高,且该预处理条件获得了最高的累积甲烷产量,说明在此条件下预处理效果最好,醋渣厌氧消化水解速率及累积甲烷产量均获得提升。

基于 Cone 模型的拟合结果,水解速率常数  $k$  值越大,意味着水解速率越大。不同条件预处理后, $k$  值均不同程度地得到提升。预处理条件为 4%  $\text{H}_2\text{O}_2$ /40  $^\circ\text{C}$ /12 h 时  $k$  值最大,这与修正的 Gompertz 模型的拟合结果基本一致。

### 3 结论

(1) 最优的预处理条件为  $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度 4%、预处理温度 40  $^\circ\text{C}$  和预处理时间 12 h。最优预处理条件下醋渣累积单位甲烷产量可达 302.0 mL/g,生物降解率达 70.0%,较未预处理提升了 54.4%。

(2) XRD 和 FT-IR 分析结果表明,预处理后纤维素可及性增大,半纤维素和木质素被部分降解或去除。同时,通过修正的 Gompertz 模型和 Cone 模型的动力学拟合分析发现,预处理提高了醋渣在厌氧消化过程中的水解速率。

### 参考文献:

- [1] 田波,赵顺华,张俊红,等. 醋糟资源化利用研究进展[J]. 中国酿造, 2017, 36(3): 1-4.  
TIAN B, ZHAO S H, ZHANG J H, et al. Research advance on utilization of vinegar residue [J]. China Brewing, 36(3): 1-4. (in Chinese)
- [2] 徐清萍,钟桂芳. 食醋醋渣的综合利用[J]. 中国调味品, 2009, 34(7): 34-37.  
XU Q P, ZHONG G F. Multipurpose utilization of vinegar residue [J]. China Condiment, 2009, 34(7): 34-37. (in Chinese)
- [3] 钟年伟. 基于畜禽粪便、醋渣、菌糠及中药渣的蔬菜栽培育苗基质: CN106631232A[P]. 2017-05-10.  
ZHONG N W. Vegetable culture and seedling substrate based on livestock and poultry excrement, vinegar residue, fungus chaff and Chinese medicine residue; CN106631232A[P]. 2017-05-10. (in Chinese)
- [4] 宋夏夏. 醋糟基质在水果型黄瓜栽培上的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.  
SONG X X. Application of vinaigrette matrix in fruit cucumber cultivation [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [5] LETTINGA G. Anaerobic digestion and wastewater treat-

- ment systems [J]. Antonie Van Leeuwenhoek, 1995, 67(1): 3-28.
- [6] LI L, FENG L, ZHANG R H, et al. Anaerobic digestion performance of vinegar residue in continuously stirred tank reactor [J]. Bioresource Technology, 2015, 186: 338-342.
- [7] FENG L, LI Y Q, CHEN C, et al. Biochemical methane potential (BMP) of vinegar residue and the influence of feed to inoculum ratios on biogas production [J]. BioResources, 2013, 8(2): 2487-2498.
- [8] FENG J Y, ZHANG J Y, ZHANG J F, et al. Influence of steam explosion pretreatment on the anaerobic digestion of vinegar residue [J]. Waste Management & Research, 2016, 34(7): 630.
- [9] CHAUDHRY A S, MILLER E L. The effect of sodium hydroxide and alkaline hydrogen peroxide on chemical composition of wheat straw and voluntary intake, growth and digesta kinetics in store lambs [J]. Animal Feed Science & Technology, 1996, 60: 69-86.
- [10] ALVAREZ-VASCO C, XIAO Z. Alkaline hydrogen peroxide (AHP) pretreatment of softwood; enhanced enzymatic hydrolysability at low peroxide loadings [J]. Biomass and Bioenergy, 2017, 96: 96-102.
- [11] 黄炳硕,孙万里. 碱性过氧化氢预处理对稻草秸秆酶解的影响[J]. 广州化工, 2017, 45(4): 70-72.  
HUANG B S, SUN W L. Effect of alkaline pretreatment on enzymatic hydrolysis of rice straw [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(4): 70-72. (in Chinese)
- [12] HE Y F, PANG Y Z, LIU Y P, et al. Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production [J]. Energy & Fuels, 2008, 22: 2775-2781.
- [13] MONLAU F, BARAKAT A, STEYER J P, et al. Comparison of seven types of thermo-chemical pretreatments on the structural features and anaerobic digestion of sunflower stalks [J]. Bioresource Technology, 2012, 120: 241-247.
- [14] RINCÓN B, HEAVEN S, BANKS C J, et al. Anaerobic digestion of whole-crop winter wheat silage for renewable energy production [J]. Energy & Fuels, 2012, 26: 2357-2364.
- [15] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [16] EL-MASHAD H M, ZHANG R H. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste [J].

- Bioresource Technology, 2010, 101: 4021–4028.
- [17] LI Y Q, ZHANG R H, LIU X Y, et al. Evaluating methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste, corn stover, and chicken manure [J]. Energy & Fuels, 2013, 27: 2085–2091.
- [18] ZHANG H, NING Z F, KHALID H, et al. Enhancement of methane production from cotton stalk using different pretreatment techniques [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 3463.

## Impact of alkaline hydrogen peroxide pretreatment on the anaerobic digestion of vinegar residues

SHI YangLei CAI FanFan NING ZhiFang ZHU Zhe LIU GuangQing\* CHEN Chang\*

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The single factor method has been employed to investigate the impact of varying the  $H_2O_2$  concentration, pretreatment temperature, and pretreatment time during alkaline hydrogen peroxide (AHP) pretreatment of vinegar residues prior to their anaerobic digestion. The optimal  $H_2O_2$  concentration, pretreatment temperature, and pretreatment time were found to be 4%, 40 °C, and 12 h, respectively. Under these optimal conditions, the highest cumulative methane yield was 302.0 mL/g (VS basis) and the biodegradation reached 70.0%, which was 54.4% higher than that for the untreated vinegar residue.

**Key words:** vinegar residue; alkaline hydrogen peroxide pretreatment; anaerobic digestion; methane production

(责任编辑:吴万玲)