

# 厨余垃圾热水解-酶解增溶及其利用技术研究

黄娜娜<sup>1</sup> 蔡星<sup>1</sup> 黄振兴<sup>1</sup> 高明<sup>2</sup> 赵明星<sup>1\*</sup>

1 江南大学 环境与生态学院

2 北京科技大学 能源与环境工程学院

DOI:10.12238/eep.v8i3.2618

**[摘要]** 本研究采用热水解-酶解组合技术处理厨余垃圾,促进有机组分从固相溶出,分析预处理对厨余垃圾厌氧产氢的影响。结果表明,热水解160℃、45min为最适增溶反应条件,水解液中SCOD、总糖浓度从96g/L和78.14g/L提高到123.10g/L和96.66g/L。挥发性脂肪酸、还原糖、可溶性蛋白质浓度提高率分别为47.4%、48.8%和21.8%。热水解后的厨余浆液进行酶解,底物质量分数为10%时,糖化效果最好。复合酶最适添加量为100u/gTS,  $\alpha$ -淀粉酶与糖化酶为1:2时,溶液中总糖和还原糖浓度为74.59g/L和42.96g/L,提高率分别为23.30%和91.4%。经热水解-酶解预处理后固相中淀粉含量从43.1%下降到17.7%。经梯度酶解后,固渣中粗蛋白从43.7%下降到32.8%。热水解-酶解预处理对上清液溶液中的基团数量和峰种类无明显影响。预处理使得厨余垃圾厌氧产氢量提高19.7%。

**[关键词]** 厨余垃圾; 热水解; 酶解; 增溶; 厌氧消化

中图分类号: TU824+.5 文献标识码: A

## Study on thermal hydrolyzation-enzymatic solubilization of kitchen waste and its utilization technology

Nana Huang<sup>1</sup> Xing Cai<sup>1</sup> Zhenxing Huang<sup>1</sup> Ming Gao<sup>2</sup> Mingxing Zhao<sup>1\*</sup>

1 School of Environment & Ecology, Jiangnan University

2 School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing

**[Abstract]** In this study, a combination technology of thermal hydrolyzation-enzymatic hydrolysis was used to treat kitchen waste to promote the dissolution of organic components, and the effect of pretreatment on anaerobic hydrogen generation from kitchen waste was indicated. The results showed that the optimal solution condition was thermal hydrolysis at 160℃ and 45 min, the concentration of SCOD and total sugar in the hydrolysate was increased from 96 g/L and 78.14 g/L to 123.10 g/L and 96.66 g/L, respectively. The increase rate of volatile fatty acids, reducing sugar and soluble protein were 47.4%, 48.8% and 21.8%, respectively. When the mass fraction of substrate was 10%, the best effect of saccharification was obtained. When the optimal dosage of complex enzyme was 100 u/g TS with the ratio of  $\alpha$ -amylase to saccharase 1:2, the concentration of total sugar and reducing sugar in the solution was 74.59 g/L and 42.96 g/L, and the increase rate was 23.30% and 91.4%, respectively. The starch content in solid phase was decreased from 43.1% to 17.7% after thermal hydrolyzation-enzymatic pretreatment. The crude protein in solid residue was decreased from 43.7% to 32.8% after enzymatic hydrolysis. Thermal hydrolyzation-enzymatic pretreatment had no significant effect on the number of groups and the type of peaks in the supernatant solution. The hydrogen yield was increased by 19.7% from kitchen waste after pretreatment.

**[Key words]** Kitchen waste; Hydrothermal treatment; Enzymatic hydrolysis; Solubilization; Anaerobic digestion

据报道,我国的厨余垃圾年产量已占城市固体废物50%以上<sup>[1-3]</sup>。由于厨余垃圾有机质含量大,采用厌氧发酵技术可将有机质转化为氢气(H<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)等可再生能源<sup>[4,5]</sup>。然而,由于厨余垃圾含水率高和成分复杂,直接进行生物处理时会出现降

解率低、反应时间长等问题<sup>[6]</sup>。因此研究者提出了多种预处理技术,强化厨余垃圾的增溶,提高后续生物处理的转化率。目前的预处理方法有物理、化学和生物等<sup>[6]</sup>,通过促进有机物的增溶,提高水解率。Ding<sup>[7]</sup>等对厨余垃圾进行热水解处理,研究表明热

水解预处理提高了厨余垃圾在后续厌氧消化中的降解率, 140℃时甲烷产量比对照提高了27.78%。热水解还具有消毒灭菌效果, 提高资源的回收率<sup>[8,9]</sup>。但热水解后仍有大量有机质存在于固相中。酶解技术可以使处理过程有更好的选择性和针对性, 由于酶的高催化作用, 能够实现对复杂成分的精细分解, 提高增溶度, 提升资源利用率。Chavan<sup>[10]</sup>研究表明热化学结合酶解预处理可以破坏厨余垃圾的复杂结构, 释放可发酵糖和营养物质。相对于单一的预处理技术, 采用多种预处理技术可提高有机物的溶出率, 尤其是针对成分复杂的底物。因此, 采用高效环保的预处理技术, 实现厨余垃圾的有机质增溶, 提高后续厌氧消化产能是重要的研究方向。

本研究以厨余垃圾为底物, 首先进行热水解增溶, 分析在不同反应中厨余垃圾理化性质的变化, 确定最佳反应条件, 然后将厨余浆液进行酶解, 实现厨余垃圾中有机质的进一步溶出, 获得酶的最适投加量。经预处理的厨余垃圾进行厌氧发酵制氢和产VFAs。氢气为清洁能源, VFAs可作为生物合成前体或化工原料, 通过生物转化可实现厨余垃圾的资源化利用。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验的厨余垃圾从江南大学食堂收集, 手工分离不可生物降解物质后用搅碎机进行粉碎, 储存在4℃冰箱中备用<sup>[11]</sup>。淀粉葡萄糖苷酶(酶活12026u/g)购于默克公司,  $\alpha$ -淀粉酶(酶活10000u/g)、纤维素酶(酶活50u/mg)、酸性蛋白酶(酶活50000u/g)购于上海麦克林生化科技股份有限公司。厌氧产甲烷污泥取自某污水处理厂的厌氧发酵罐。厨余垃圾和厌氧产甲烷污泥的性质如表1所示。

表1 厨余垃圾和厌氧产甲烷污泥性质

| 指标      | 厨余垃圾       | 厌氧产甲烷污泥    |
|---------|------------|------------|
| TS/%    | 26.58±1.12 | 11.31±0.57 |
| VS/%    | 22.32±0.95 | 9.87±0.50  |
| pH      | 5.78±0.10  | 6.86±0.10  |
| 粗淀粉/%TS | 43.10±2.30 |            |
| 粗蛋白/%TS | 21.21±1.88 |            |
| 粗脂肪/%TS | 18.14±1.23 |            |
| 粗纤维/%TS | 16.08±1.29 |            |

注: TS为总固体(total solid); VS为挥发性固体(volatile solid)。

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 温度和时间对厨余垃圾热水解增溶影响实验

将厨余垃圾与水按2:1(按重量计)混合并搅拌均匀, 混合后的物质可溶性化学需氧量(SCOD)为96g/L、总糖为78.14g/L、可溶性蛋白质为4.78g/L、挥发性脂肪酸(VFAs)为2.97g/L、氨氮为413.7mg/L、pH为5.81。取混合后的80g厨余垃圾于150mL反应釜中进行热水解, 将反应釜放置烘箱中加热, 在80、100、120、140、160℃温度下热水解30、45、60、75、90、105min。冷却到室温后将厨余浆液离心8000rpm、10min, 用于后续实验<sup>[12]</sup>。每组实验重复三次取平均值。

#### 1.2.2 酶对厨余垃圾增溶影响实验研究

##### 1.2.2.1 底物质量分数对厨余浆液酶解实验影响研究

实验的底物为热水解后的厨余浆液, 称取厨余浆液于150mL锥形瓶中, 用去离子水调节底物质量分数。设置八组实验, 底物质量浓度分别为2%、4%、6%、8%、10%、12%、14%、16%。用1mol/L的NaOH或HCl调节pH到5.0<sup>[10]</sup>。加入酶总量为100u/gTS的 $\alpha$ -淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶,  $\alpha$ -淀粉酶与淀粉葡萄糖苷酶用量为1:2。在恒温摇床中50℃、120r/min酶解反应4h。反应结束后, 100℃灭活10min。每组实验重复三次取平均值。

##### 1.2.2.2 $\alpha$ -淀粉酶与淀粉葡萄糖苷酶协同酶解厨余浆液实验影响研究

确定底物质量分数后, 设置七组 $\alpha$ -淀粉酶:淀粉葡萄糖苷酶为5:1、3:1、2:1、1:1、1:2、1:3、1:5,  $\alpha$ -淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶的总量为100u/gTS, 空白组不添加酶。确定底物质量分数,  $\alpha$ -淀粉酶与淀粉葡萄糖苷酶比例后, 设置五组不同的酶添加总量为50、100、150、200、250u/gTS。不添加酶为空白组。其他反应条件同1.2.2.1。每组实验重复三次取平均值。

##### 1.2.2.3 淀粉酶-酸性蛋白酶对厨余浆液梯度酶解研究

厨余垃圾的有机质主要为碳水化合物和蛋白质, 蛋白酶能将蛋白质分解, 为后续厌氧发酵提供底物。由于淀粉酶和蛋白酶的最佳反应条件不同, 且蛋白酶会影响淀粉酶的活性, 因此将碳水化合物与蛋白酶的水解过程分开<sup>[13]</sup>。淀粉酶酶解后的厨余浆液用酸性蛋白酶进行酶解。设置八组酶添加量为0、20、40、60、80、100、120、140u/gTS。用1mol/L的NaOH或HCl调节pH到4.0<sup>[14]</sup>。在恒温摇床中50℃、120r/min酶解反应4h。反应结束后, 100℃灭活10min。每组实验重复三次取平均值。

##### 1.2.3 底物预处理对厨余垃圾厌氧消化产氢的影响实验研究

将厌氧产甲烷污泥在37±1℃培养一周后在高压灭菌锅中121.0℃、20min进行热处理, 灭活产甲烷菌以获得产氢污泥<sup>[15]</sup>。产氢实验组分为未处理组与预处理组, 在250mL的血清瓶中进行。未处理组反应底物是150mL的1.2.1中的初始厨余浆液。等量的初始厨余浆液经1.2.1和1.2.2处理后的上清液为预处理

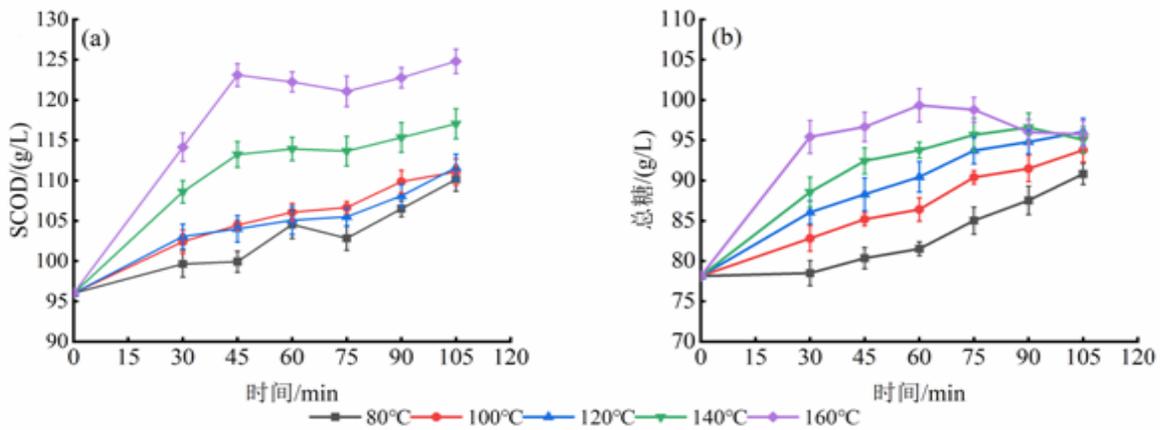


图1 不同温度和时间下厨余垃圾 SCOD(a)和总糖(b)变化情况

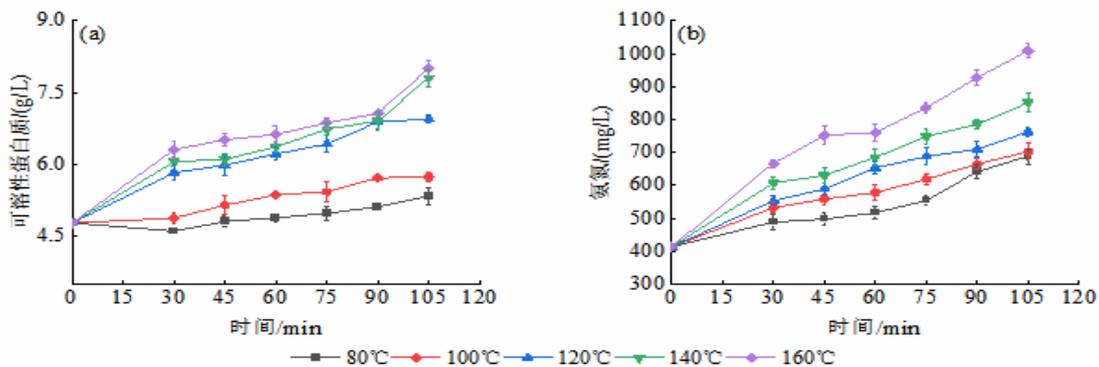


图2 不同温度和时间下可溶性蛋白质(a)和氨氮(b)的变化情况

组反应底物。厨余垃圾与接种污泥的比例为1.5:1 (VSS比)。采用3mol/L的NaOH或HCl调节初始pH到9.0, 反应温度为 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ 。反应瓶充氮气3min以保持厌氧环境后进行厌氧产氢反应, 集气袋进行气体收集。

### 1.3 实验分析方法

TS、VS、SCOD和氨氮采用标准方法测定<sup>[16]</sup>; pH采用pH计测定; 淀粉采用酸水解法GB/T 5009.9-2016《食品安全国家标准食品中淀粉的测定》测定; 粗脂肪采用索氏抽提法GB/T 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》测定; 蛋白质采用凯氏定氮法GB/T 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》测定; 粗纤维采用全自动纤维分析仪(ANKOM A2000i型)测定; 还原糖测定采用3,5-二硝基水杨酸法<sup>[17]</sup>; 总糖测定采用苯酚-硫酸法<sup>[18]</sup>; 可溶性蛋白质测定采用Folin-酚法<sup>[19]</sup>。采用傅里叶变换红外(FTIR)光谱(Nicolet 6700 光谱仪)对厨余垃圾上清液的官能团进行表征。

VFAs采用气相色谱仪(GC-2010PLUS, 日本岛津)测定, 有火

焰电离检测器并配置peg-20-m毛细管色谱柱, 分离柱温度 $70.0^\circ\text{C}$ , 进样口与检测器温度 $250.0^\circ\text{C}$ , 载气采用高纯氮气。气体组分的测定采用气相色谱仪(GC-2014, 日本岛津), 有热导检测器和TDX-1填充柱, 色谱柱温度 $180.0^\circ\text{C}$ 、进样器温度 $100.0^\circ\text{C}$ 、检测器温度 $180.0^\circ\text{C}$ , 氦气作为载气。

总糖/还原糖质量分数(E)计算公式如下:

$$E = \frac{C_1 \times V_1}{W_0} \times 100\%$$

式中:  $C_1$ , 酶解后水解液中总糖/还原糖浓度, g/L;  $V_1$ , 水解液体积, L;  $W_0$ , 厨余垃圾干重(以TS计), g。

通过方差分析(ANOVA)以及显著差异进行检验, 当P小于0.05时, 差异具有统计学意义; 而当P大于或等于0.05时, 差异不具有统计学意义。

## 2 结果与分析

2.1 热水解温度和时间对厨余垃圾SCOD和总糖浓度变化影响

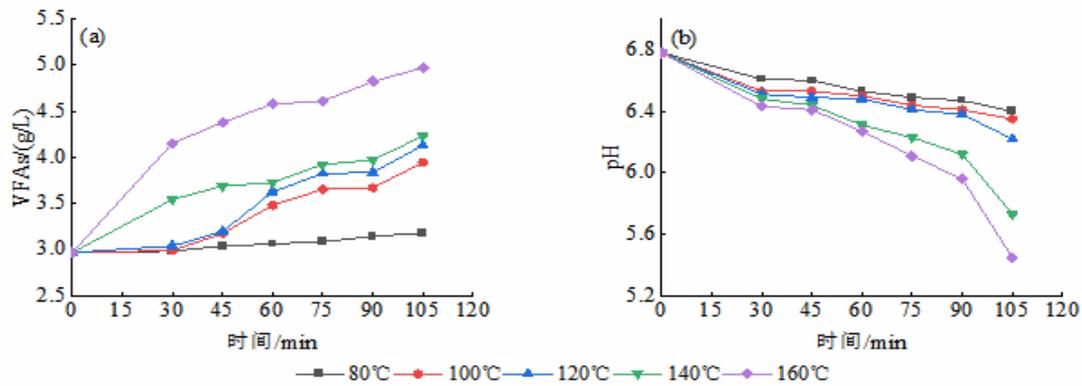


图3 不同温度和时间下 VFAs(a)和 pH(b)的变化情况

由图1-a可知,在80℃、100℃、120℃、140℃下SCOD浓度随着热水解时间的延长呈上升趋势。随着热水解温度的提高(140℃、160℃),SCOD浓度提升显著。在160℃,水解时间45-105min时,SCOD浓度在121.07-124.80g/L,比未预处理组提高了26.1%-30%。这表明高温加速了有机物的溶解,厨余垃圾固相中的有机质大量溶出,提高有机质的水解。

厨余垃圾热水解后总糖变化如图1-b所示。由图可知,在80℃、100℃、120℃下,总糖浓度随着热水解时间的延长而升高。热解60min后提高较快,这表明相对于温度,时间对于总糖的溶出影响更大。140℃时,水解时间90min时总糖浓度上升,而105min时却下降。在160℃时,水解时间60min时浓度最大为99.33g/L,提高了27.12%。但是在水解时间60min后,总糖呈下降趋势,这可能是在较高温度下,发生了美拉德反应,损失了部分总糖。这与Liu<sup>[20]</sup>的研究结果一致。

2.2热水解温度和时间对厨余垃圾可溶性蛋白和氨氮浓度变化影响

厨余垃圾中的蛋白质主要存在于固相中,初始厨余浆液中蛋白质浓度较低,为4.08g/L。经热水解预处理后,蛋白质从固相向液相释放,可溶性蛋白质浓度提高(图2-a)。随着热水解温度的升高和时间的延长,可溶性蛋白质(SP)浓度提高。在较低温度80℃、100℃下,SP浓度增加并不明显( $P>0.05$ )。但在高温120℃、140℃、160℃下,SP浓度迅速上升。160℃、105min时SP最高为8.01g/L,比初始厨余浆液提高了1.96倍。

在热水解过程中,厨余垃圾中的蛋白质等含氮有机物被分解为小分子物质,并进一步转化为氨态氮等。由图2-b可知,氨氮的变化趋势与SP类似,即随着温度的升高和时间的延长,氨氮浓度上升。在较高温度下,时间的延长更有利于氨氮的生成。在160℃下,氨氮提高幅度更大,为62%-137%。由图1-b可知,由于美拉德反应,部分多糖和氨基酸生成难降解物质。但

氨氮仍呈上升趋势,其原因可能是高温高压下氨氮的生成高于降解<sup>[21]</sup>。

2.3热水解温度和时间对厨余垃圾VFAs和pH变化影响

厨余垃圾热水解中的VFAs变化情况如图3-a所示。随着热水解温度 and 时间的增加,总有机酸浓度升高。在较低温度(80℃)下,延长反应时间对VFAs的提高作用并不明显,仅为4.4%-7.0%。在100℃、120℃、140℃下,当加热时间达到60min后,VFAs浓度波动不大,稳定在3.5-4.2g/L。在160℃下,VFAs增幅最大,反应105min后比初始浓度提高了67.3%。研究结果表明相对于反应时间,热解温度更有利于有机酸的溶出,这与闫旭升<sup>[21]</sup>的研究结果一致。

不同温度下厨余浆液的pH随着热水解时间的增加而下降(图3-b)。在140℃、160℃时随着热解时间的延长,pH下降较快。这是由于有机酸不断从固相释放到液相,VFA浓度提高使得pH下降。研究结果表明,厨余垃圾水热处理最适条件为温度160℃,时间45-75min。当水解时间大于75min时,浆液中SCOD和蛋白质浓度增大,但会出现美拉德反应,使总糖和蛋白质下降,同时产生一些难降解物质,影响后续厨余浆液利用。考虑到能耗和时间,本实验选择160℃、45min为厨余垃圾热水解最适条件,后续进行酶解反应。

2.4底物质量分数对厨余浆液酶解糖化效果的影响

用热水解后的厨余浆液为底物,设置不同底物质量分数(以厨余垃圾干重计),根据总糖和还原糖的质量分数确定酶解反应的最佳底物质量分数。图4为不同底物质量分数下,总糖和还原糖的浓度及质量分数变化情况。

由图4可知,随着底物质量分数的增加,水解液中的总糖和还原糖浓度逐渐提高。在底物质量分数为10%时,总糖和还原糖质量分数最大,分别为71.36%、50.11%。当底物质量分数超过10%时,总糖和还原糖质量分数呈下降趋势。过高的底物

浓度反应体系中的粘度会增加,阻碍酶与底物之间的接触,降低水解效率<sup>[22]</sup>。因此,将底物质量分数为10%的厨余浆液作为后续酶解的底物。

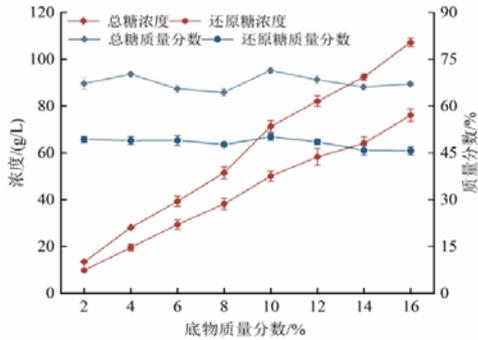


图4 总糖和还原糖的浓度、质量分数的变化情况

### 2.5 复合酶添加量对厨余浆液酶解效果的影响

图5-a和图5-b为在不同 $\alpha$ -淀粉酶:淀粉葡萄糖苷酶添加下,水解液中总糖和还原糖变化情况。研究表明随着淀粉葡萄糖苷酶比例的提高,总糖和还原糖浓度呈现先上升后下降的趋势。在 $\alpha$ -淀粉酶与淀粉葡萄糖苷酶添加1:2时,酶解糖化效果最好。此时总糖、还原糖浓度最高为72.98g/L和41.38g/L,提高率分别为18.30%和97.4%。这可能是厨余垃圾经过高温热水解处理后部分成分已经液化,需要更多的淀粉葡萄糖苷酶进行酶解<sup>[23]</sup>。

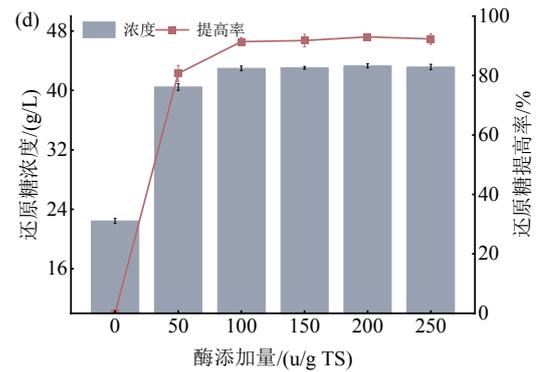
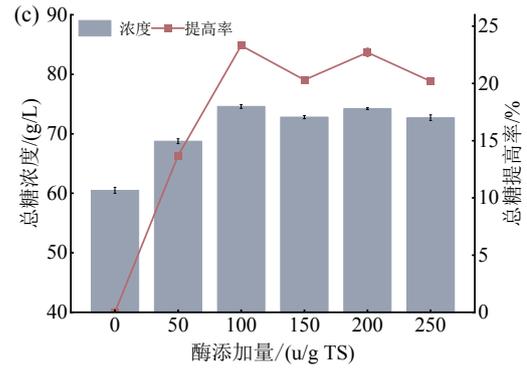
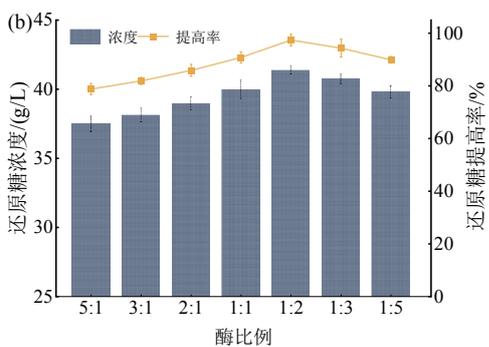
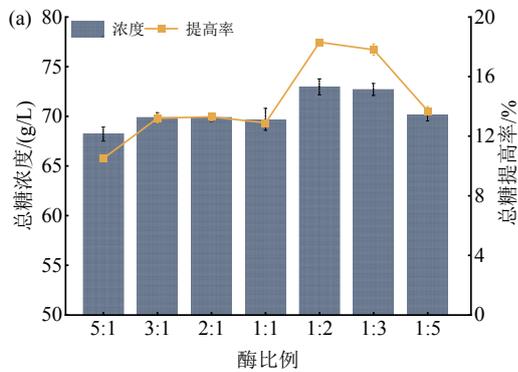


图5 复合酶的添加比例(a, b)和添加量(c, d)对液相中总糖和还原糖的影响

研究表明增加复合酶的添加量,水解液中总糖浓度和还原糖浓度迅速上升。但继续增加复合酶量,总糖浓度和还原糖浓度变化不大(图5-c, 5-d)。在添加量为100u/gTS时,总糖、还原糖浓度分别为74.59 g/L和42.96g/L,提高率为23.30%和91.4%。本实验开展了纤维素酶添加的预实验,结果表明加入10u/g TS时水解液中还原糖浓度仅提高6.4%,继续增加酶量到50u/gTS时,还原糖提高率为8.1%。因此未考虑纤维素酶的使用。实验结果表明底物质量分数为10%, $\alpha$ -淀粉酶:淀粉葡萄糖苷酶为1:2,酶添加量为100u/gTS时最佳。热水解后厨余垃圾中淀粉含量从43.1%下降到33.2%,继续糖化淀粉含量又下降到17.7%。

### 2.6 淀粉酶-酸性蛋白酶对厨余垃圾梯度酶解效果的影响

厨余浆液经糖化酶解后,有机物中的糖类溶出到液相,固渣中蛋白质比例提高。为提高资源回收率,添加酸性蛋白酶将蛋白质从固相溶出到液相。图6为不同酸性蛋白酶添加量下,厨余固渣和溶液中蛋白质比例变化情况。随着酶添加量的增加,固渣中蛋白质质量下降,而在溶液中上升。当酸性蛋白酶添加量超过60u/gTS时固渣中粗蛋白变化不大。但是添加到120u/gTS时,固渣中粗蛋白含量稳定在33%左右,上清液中蛋白质占比提高。考虑到经济成本,选用60u/gTS作为适宜添加量。糖化后固渣中粗蛋白含量为43.7%,经蛋白酶反应后下降到35.5%。

### 2.7 预处理前后上清液中有机物及官能团变化

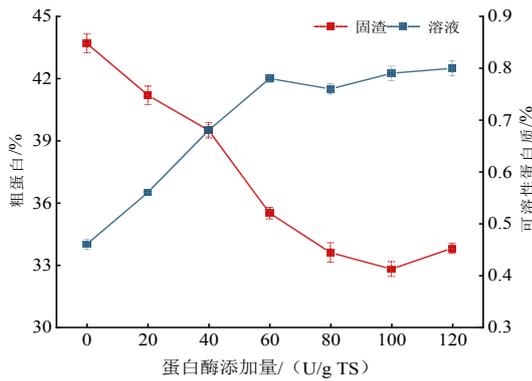


图6 梯度酶解后固渣中粗蛋白与溶液中可溶性蛋白质占比情况  
通过傅里叶红外光谱分析预处理前后厨余垃圾上清液中官能团的存在形式与变化情况。如图7所示,在3263cm<sup>-1</sup>处的峰为羟基(OH)伸缩振动峰,热水解后的峰强度与原样和热解-酶解的峰强相差不大。在1635cm<sup>-1</sup>处峰为羰基(C=O)伸缩振动峰,结果表明预处理前后羰基基团基本没有变化。在1026cm<sup>-1</sup>处的峰为醇类化合物的C-O伸缩振动峰,相比于原样,热解后上清液在此处峰的强度提高,热解-酶解的峰强度有所降低。结果表明,预处理后溶液中的OH和C-O基团数量有所不同,但峰的种类与未处理基本相同,并没有对溶液中的基团产生明显影响。

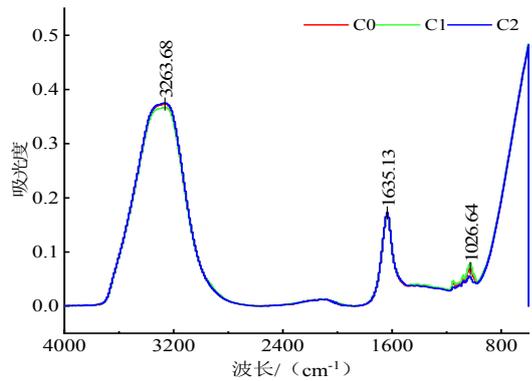


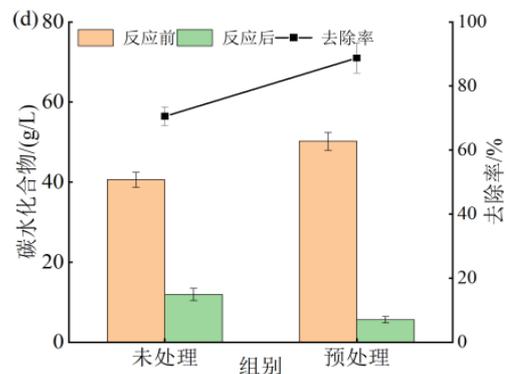
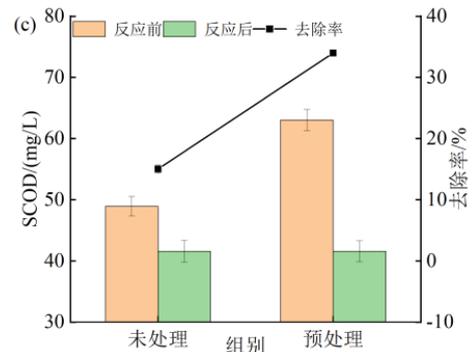
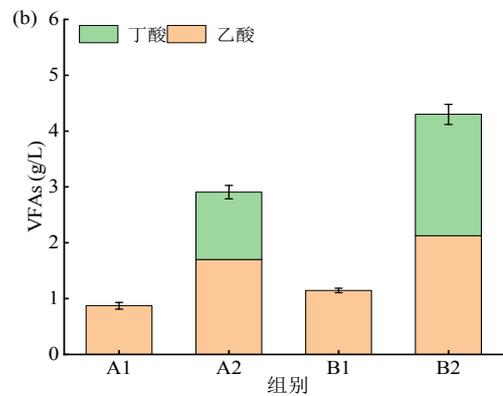
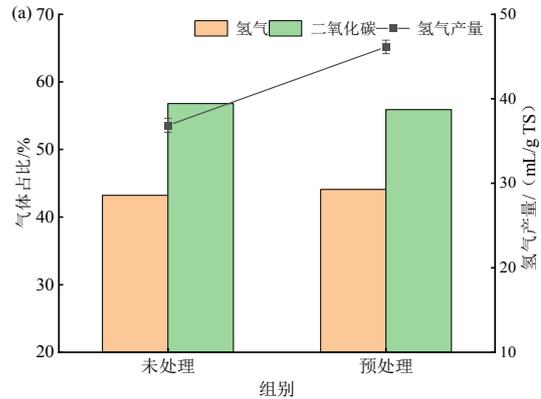
图7 预处理前后厨余浆液的FTIR光谱图

注: C0-原样上清液 C1-热水解后上清液 C2-热解-酶解后上清液

### 2.8 预处理对厨余垃圾厌氧产氢效果的影响

预处理提高了液相中可溶性有机物浓度,微生物能利用更多的营养物质进行代谢。经热水解-酶解预处理后的氢气产量从38.86 mL/g TS上升到46.13mL/g TS,产氢量提高了19.7%(图8-a)。两组实验反应前的VFAs分别为0.872g/L、1.147g/L,反应后为2.907g/L、4.301g/L,预处理后VFAs产率提高了48.26%。研究表明预处理促进了SCOD的降解,去除率从未处理组的15.03%提高到34.01%。未处理组的可溶性碳水化合物浓度从40.58g/L下降到11.95g/L,降解率为70.55%,预处理组从50.21g/L下降到5.65g/L,降解率为88.74%。未处理组和预处理组可溶性蛋白质

的去除率分别为47.37%和54.66%,可溶性碳水化合物浓度下降明显,这表明微生物优先利用可溶性碳水化合物<sup>[24]</sup>。



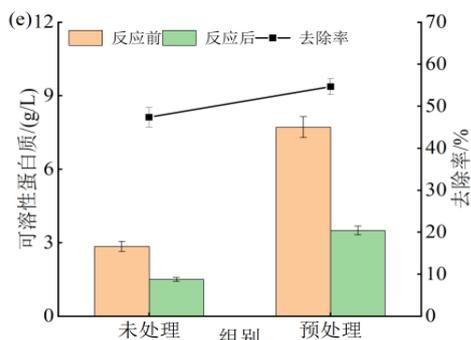


图8 预处理前后厨余垃圾产氢的气体(a)、VFAs(b)、SCOD(c)、可溶性碳水化合物(d)和可溶性蛋白质(e)变化

### 3 结论

研究表明热水解-酶解预处理对厨余垃圾有较好的增溶效果。在160℃下反应45-75min为厨余垃圾热水解的最适条件,液相中SCOD和总糖最大提高率为28.2%和23.7%。热水解后厨余浆液酶解糖化率随底物质量分数呈先上升后下降趋势,最佳底物质量分数为10%。复合酶添加量一定时,随着淀粉葡萄糖苷酶占比的提高,糖化效果呈现先上升后下降的趋势。还原糖的溶出率随复合酶的添加总量呈现先升高后趋于稳定的变化。在 $\alpha$ -淀粉酶:淀粉葡萄糖苷酶为1:2且添加总量为100u/gTS时,溶液中总糖、还原糖浓度最高,糖化效果最好。预处理后固渣中淀粉含量从43.1%下降到17.7%,经酸性蛋白酶水解后粗蛋白含量最高下降10.9%。预处理后的厨余垃圾厌氧消化氢气产量提高19.7%。本文探究了厨余垃圾热水解和酶解处理参数的最优值,可为厨余垃圾高效预处理工艺提供依据。

#### [项目资助]

国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项目(2022YFE0118800)。

#### [参考文献]

- [1] XU Z, XU W, ZHANG L, et al. Bacterial dynamics and functions driven by bulking agents to mitigate gaseous emissions in kitchen waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332: 125028.
- [2] LIU W, DONG Z, SUN D, et al. Bioconversion of kitchen wastes into biofloculant and its pilot-scale application in treating iron mineral processing wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121505.
- [3] LIU M, OGUNMOROTI A, LIU W, et al. Assessment and projection of environmental impacts of food waste treatment in China from life cycle perspectives[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 807: 150751.
- [4] WANG H, XU J, SHENG L. Study on the comprehensive utilization of city kitchen waste as a resource in China[J]. *Energy*, 2019, 173: 263-277.

[5] BLUMENSTEIN B, SIEGMEIER T, MOLLER D. Economics of anaerobic digestion in organic agriculture: Between system constraints and policy regulations[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 86: 105-119.

[6] MENG Q, LIU H, ZHANG H, XU S, et al. Anaerobic digestion and recycling of kitchen waste: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022, 20(3): 1745-1762.

[7] DING L, YANG M, AREEORASERT C, et al. Analysis of micro-particle effect and methanogenic potential of food waste model compounds by hydrothermal pretreatment[J]. *Fuel*, 2023, 331: 125686.

[8] SASAKI K, AIZAKI H, MOTOYAMA M, et al. Impressions and purchasing intentions of Japanese consumers regarding pork produced by 'Ecofeed,' a trademark of food-waste or food co-product animal feed certified by the Japanese government[J]. *Animal Science Journal*, 2011, 82(1): 175-180.

[9] CHEN T, JIN Y, QIU X, et al. A hybrid fuzzy evaluation method for safety assessment of food-waste feed based on entropy and the analytic hierarchy process methods[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(16): 7328-7337.

[10] CHAVAN S, YADAV B, TYAGI R D, et al. Comparative study of chemical and enzymatic pre-treatments of Kitchen waste (KW) to generate fermentable sugars for the production of polyhydroxyalkanoates (PHA)[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2024: 109240.

[11] CHEN L Y, QIN Y J, CHEN B Q, et al. Enhancing degradation and biogas production during anaerobic digestion of food waste using alkali pretreatment[J]. *Environmental Research*, 2020, 188: 109743.

[12] LI Y, JIN Y, LI J, et al. Effects of thermal pretreatment on the biomethane yield and hydrolysis rate of kitchen waste[J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 47-58.

[13] LI P, XIE Y, ZENG Y, et al. Bioconversion of Welan Gum from Kitchen Waste by a Two-Step Enzymatic Hydrolysis Pretreatment[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2017, 183(3): 820-832.

[14] 赵淑兰. 餐厨垃圾酶法分质回收碳源和氮源的工艺优化及残渣利用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.

[15] PARK M J, JO J H, PARK D, et al. Comprehensive study on a two-stage anaerobic digestion process for the sequential production of hydrogen and methane from cost-effective molasses[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(12): 6194-6202.

[16]国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.

[17]高文军,李卫红,王喜明,等.3,5-二硝基水杨酸法测定麦芽中还原糖和总糖含量[J].中国药业,2020,29(09):113-116.

[18]DUBOIS MICHEL,GILLES K A,HAMILTON J K,et al. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances[J].Analytical Chemistry,1956,28(3):350-356.

[19]H O Lowry, J N Rosebrough, L A Farr,et al.福林酚试剂法测定蛋白质[J].食品与药品,2011,13(03):147-151.

[20]LIU J,YIN J,HE X,et al.Optimizing food waste hydrothermal parameters to reduce Maillard reaction and increase volatile fatty acid production[J].Journal of Environmental Sciences,2021,103(3):43-49.

[21]闫旭升.热水解耦合外源物质对污泥有机物变化及类黑素生成影响研究[D].北京:北京工业大学,2023.

[22]周昕.淀粉酶对大米支链淀粉酶解作用机理的研究[D].合肥:安徽农业大学,2017.

[23]邱卫华,修涵,赵芸卿,等.不同物质组成餐厨垃圾的多酶协同酶解研究[J].环境工程,2023,41(S1):383-387+424.

[24]CHEN S,YAO F,PI Z,et al.Evaluating the role of salinity in enhanced biogas production from two-stage anaerobic digestion of food waste by zero-valent iron[J].Journal of Environmental Management,2024,351:119911.

#### 作者简介:

黄娜娜(1999--),女,安徽阜阳人,硕士生,江南大学环境与生态学院,主要研究方向为固体有机废弃物处理技术。

#### \*通讯作者:

赵明星(1982--),男,江苏苏州人,博士,江南大学环境与生态学院教授,主要研究方向为环境生物技术。