

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0079

王娇,刘吉宝,宋云鹏,等.2021.高含固餐厨垃圾有机组成对其流变特征的影响[J].环境科学学报 41(10):4107-4115

Wang J, Liu J B, Song Y P, et al. 2021. Effect of organic composition of high solid food waste on its rheological behaviors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 41(10):4107-4115

# 高含固餐厨垃圾有机组成对其流变特征的影响

王娇<sup>1,2</sup>, 刘吉宝<sup>2,3,\*</sup>, 宋云鹏<sup>2</sup>, 徐宇峰<sup>1</sup>, 陈梅雪<sup>2,3</sup>, 桂双林<sup>4</sup>, 魏源送<sup>2,3,4</sup>

1. 河北工程大学 能源与环境工程学院 邯郸 056038
2. 中国科学院生态环境研究中心 水污染控制实验室 北京 100085
3. 中国科学院生态环境研究中心 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 北京 100085
4. 江西省科学院 能源研究所 南昌 330096

**摘要:**餐厨垃圾在厌氧消化过程中的流变特征直接关系到搅拌传质和产甲烷效率,而餐厨垃圾的有机物组成差异可能导致其表现出不同的流变特征。本研究以碳水化合物、蛋白质、脂肪和纤维素等不同有机组成比例的餐厨垃圾为对象,通过单因素实验,研究单一组分对餐厨垃圾流变特征的影响。结果表明,在 TS 15% 的条件下,淀粉类碳水化合物比例的增加将增大餐厨垃圾的粘度,使屈服应力和宾汉粘度分别呈指数( $\tau_B = 6.098x^{0.14}$ )和线性关系( $\mu_B = 0.795x + 0.0971$ )增长;热加工后的豆制品蛋白质比例增加反而降低餐厨垃圾粘度,使屈服应力和宾汉粘度分别呈线性( $\tau_B = 6.976x + 12.043$ )降低和指数( $\mu_B = 0.668e^{-1.584x}$ )降低的变化趋势;粮油类脂肪因其为牛顿流体特征,其比例的增加不仅降低了餐厨垃圾粘度,屈服应力和宾汉粘度均呈对数降低( $\tau_B = 8.459\ln x + 37.184$ 和 $\mu_B = 0.373\ln x + 1.676$ )的变化趋势;而蔬菜类纤维素比例的增加将增大餐厨垃圾粘度,屈服应力和宾汉粘度均呈指数关系( $\tau_B = 4.938e^{14.138x}$ 和 $\mu_B = 0.263e^{11.76x}$ )增加。因此,未来需依据不同有机组分组成差异下餐厨垃圾的不同流变特征变化规律,合理考虑不同组成餐厨垃圾搅拌控制策略和物料含固率。

**关键词:**餐厨垃圾;有机组成;粘度;流变特征;宾汉模型

文章编号:0253-2468(2021)10-4107-09 中图分类号:X705 文献标识码:A

## Effect of organic composition of high solid food waste on its rheological behaviors

WANG Jiao<sup>1,2</sup>, LIU Jibao<sup>2,3,\*</sup>, SONG Yunpeng<sup>2</sup>, XU Yufeng<sup>1</sup>, CHEN Meixue<sup>2,3</sup>, GUI Shuanglin<sup>4</sup>, WEI Yuansong<sup>2,3,4</sup>

1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038
2. Laboratory of Water Pollution Control Technology, Research Center of Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
3. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
4. Institute of Energy, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096

**Abstract:** The rheological behaviors of food waste in anaerobic digestion are related to efficiencies of the stirring, mass transfer and methane production, and the difference of organic composition of food waste may lead to different rheological behaviors. In this study, the food waste with different organic components of carbohydrate, protein, lipid and cellulose was selected in order to investigate effects of each organic component on the rheological behaviors of food waste by single factor experiment. The results showed that under the condition of total solids (TS) at 15%, the viscosity of food waste increased with the increase of starch carbohydrate percentage, and the yield stress and Bingham viscosity increased exponentially ( $\tau_B = 6.098x^{0.145}$ ) and linearly ( $\mu_B = 0.795x + 0.0971$ ), respectively. With the increase of protein proportion with hot-processed bean products, the viscosity of food waste decreased, and the yield stress and Bingham viscosity decreased linearly ( $\tau_B = 6.976x + 12.043$ ) and exponentially ( $\mu_B = 0.668e^{-1.584x}$ ), respectively. As grain and oil fats is characterized as Newtonian fluid, the viscosity of food waste decreased with the increase of its proportion, and both yield stress and Bingham viscosity decreased logarithmically ( $\tau_B = 8.459\ln x + 37.184$  and  $\mu_B = 0.373\ln x + 1.676$ ). The viscosity of food waste increased with the increase of the proportion of vegetable cellulose, and both the yield stress and Bingham viscosity increased exponentially ( $\tau_B = 4.938e^{14.138x}$  and  $\mu_B = 0.263e^{11.76x}$ ). Therefore, considering the rheological behaviors of food waste vary with different organic components, it is necessary to optimize the mixing control strategies and solid content of food waste with different components during the AD treating the food waste in the future.

**Keywords:** food waste; organic composition; viscosity; rheological behaviors; Bingham model

收稿日期:2021-01-05 修回日期:2021-02-20 录用日期:2021-02-20

基金项目:国家重点研发计划项目(No.2018YFD1100603)

作者简介:王娇(1994—),女,E-mail:1196933389@qq.com; \* 责任作者,E-mail:jbliu@rcees.ac.cn

## 1 引言( Introduction)

随着经济的快速发展和人民物质生活水平的提高,餐厨垃圾产量日益增加。餐厨垃圾水分和有机物含量高,极易腐败发臭,传统的填埋、焚烧等处理方法易引发渗滤液污染土壤和地下水,以及恶臭气体排放污染环境等问题(乔子茹, 2020; 唐琳钦, 2020)。而采用厌氧消化处理餐厨垃圾既可解决环境污染问题,产生的甲烷又可制备生物燃气,从而实现餐厨垃圾的资源化利用(王凯军等, 2020)。根据含固率(Total Solid, TS)的不同,厌氧消化分为干式(TS > 15%)和湿式(TS < 15%) (Kothari *et al.*, 2014)。与湿式厌氧消化相比,干式厌氧消化具有沼液产量小、占地小以及容积产气率高的优点(Karthikeyan *et al.*, 2013)。干式厌氧消化最显著的特点是进料含固率比较高,一般在15%以上。然而,随着物料含固率的提高,粘度增大,物料的流动性降低,影响反应器内的流态以及微生物和底物之间的传质,容易引起干式厌氧消化底物利用效率低、工艺稳定运行难等问题(Liu *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2018)。因此,高含固率物料的流变特征是厌氧消化工艺设计和运行的重要参数,对厌氧消化传质、传热、搅拌和物料输送等过程单元的优化设计至关重要(Liu *et al.*, 2016; Miryahyaei *et al.*, 2019)。

餐厨垃圾中可被厌氧消化降解产甲烷的主要有机物组分包括碳水化合物、蛋白类和油脂类化合物(Campuzano *et al.*, 2016; 王凯军等, 2020)。已有研究报道了破碎的餐厨和厨余垃圾具有特定的流变特征。Diamante等(2015)综述了不同水果和蔬菜制品的流变特征,指出随着可溶性固体物质含量的增加,破碎果蔬的稠度系数随活化能值的增大而增大,果蔬制品的可溶性固体物质含量越高,粘度受温度的影响程度越大。Kim等(2018)研究了餐厨垃圾(学校食堂收集)发酵产氢过程的流变特征,结果表明,随着底物浓度的增加,粘度呈增加的趋势,随着发酵的进行,粘度显著降低,且与底物浓度相比,pH值变化对流变特征的影响较小。Baroutian等(2018)研究了不同组分对餐厨垃圾流动性和粘弹性的影响,结果表明,不同种类的餐厨垃圾(碳水化合物、蔬菜水果和肉类)表现出剪切变稀的流变特征。特别地,随着餐厨垃圾中碳水化合物含量的增加,物料的粘度降低。

但现有研究对不同有机组成餐厨垃圾流变特

征变化规律的差异仍然认识不足,且不同区域或来源的餐厨垃圾组成比例有一定差异,明确这种差异情况下流变特征变化规律的区别,对于餐厨垃圾高含固厌氧消化物料组成、含固率调节以及反应器搅拌系统优化设计至关重要。

为此,本研究针对餐厨垃圾的主要有机组成成分,调配餐厨垃圾中淀粉类碳水化合物、蛋白质、脂肪和纤维素类碳水化合物的组成比例,结合文献调研(王凯军等, 2020),以淀粉类碳水化合物:蛋白质:脂肪:纤维素类碳水化合物=11:4:4:1(W/W)的组成比例为参考,通过单因素实验,在一致的物料含固率(TS 15%)前提下,研究单一组分比例变化对混合物料流变特征影响及变化规律,以期后续高含固厌氧消化搅拌过程优化设计提供支撑。

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 有机组分物料选择

据报道(王凯军等, 2020),我国餐厨垃圾的有机组成成分的比例为:含水率(湿基)73%~95%、碳水化合物(干基)55.2%~61.9%、蛋白质(干基)13%~27%、油脂(干基)4.6%~42%、纤维素(干基)2.6%~6.5%。根据Baroutian(2018)的研究方法,取其湿基水平下的中间值作为本研究的有机组分的参考比例,即淀粉类碳水化合物:蛋白质:脂肪:纤维素类碳水化合物=11:4:4:1(W/W)。

各组分物料的选择参考文献中研究餐厨垃圾厌氧消化的物料类型(张鹏帅, 2018; Baroutian, 2018; 朱慧, 2019),选择馒头代表淀粉类碳水化合物,豆腐皮代表豆制品类蛋白质,粮油代表植物性脂肪,包菜代表纤维素类碳水化合物,物料性质如表1所示。为避免餐厨垃圾除单一有机组成差异外其他因素干扰,实验中使用破碎机将不同物料破碎均匀,加超纯水将豆腐皮、馒头、粮油稀释至含固率15%,而包菜则需要加热煮熟之后破碎,沥除水分,并在70℃烘箱中放置4h,烘至含固率15%,然后根据实验设计按比例混合,搅拌均匀。

表1 餐厨垃圾物料性质(以湿基计)

| 物料     | TS           | VS           | VS/TS  |
|--------|--------------|--------------|--------|
| 馒头     | 60.96%±0.27% | 60.27%±0.27% | 98.86% |
| 豆腐皮    | 44.83%±0.76% | 42.91%±0.68% | 95.72% |
| 粮油     | 99.93%±0.01% | 99.90%±0     | 99.97% |
| 包菜(未煮) | 6.79%±0.01%  | 6.26%±0      | 92.17% |
| 包菜(煮过) | 9.98%±0.26%  | 9.48%±0.25%  | 94.95% |

## 2.2 实验设计

根据实际与文献调研,以淀粉类碳水化合物: 豆制品类蛋白质: 植物性脂肪: 纤维素类碳水化合物 = 11:4:4:1 (W/W) 的比例为参考,通过单因素实

验,研究混合物料含固率不变的情况下(TS 15%),单一组分比例变化对物料流变特征的影响,实验设计如表 2 所示.

表 2 实验设计  
Table 2 Experimental design

| 淀粉类碳水化合物组成变化比例  |                    |             |              |              |            |
|-----------------|--------------------|-------------|--------------|--------------|------------|
| 实验组             | 组分比例               | 馒头/g        | 豆腐皮/g        | 粮油/g         | 包菜/g       |
| T-1             | 1 : 4 : 4 : 1      | 10.00( 10%) | 40           | 40           | 10         |
| T-2             | 3.86 : 4 : 4 : 1   | 30.88( 30%) | 32           | 32           | 8          |
| T-3             | 9 : 4 : 4 : 1      | 54.00( 50%) | 24           | 24           | 6          |
| T-4             | 21 : 4 : 4 : 1     | 84.00( 70%) | 16           | 16           | 4          |
| T-5             | 81 : 4 : 4 : 1     | 81.00( 90%) | 4            | 4            | 1          |
| 豆制品类蛋白质组成变化比例   |                    |             |              |              |            |
| 实验组             | 组分比例               | 馒头/g        | 豆腐皮/g        | 粮油/g         | 包菜/g       |
| D-1             | 11 : 1.78 : 4 : 1  | 55          | 8.90( 10%)   | 20           | 5          |
| D-2             | 11 : 6.86 : 4 : 1  | 44          | 27.42( 30%)  | 16           | 4          |
| D-3             | 11 : 16 : 4 : 1    | 44          | 64.00( 50%)  | 16           | 4          |
| D-4             | 11 : 37.33 : 4 : 1 | 22          | 74.66( 70%)  | 8            | 2          |
| D-5             | 11 : 144 : 4 : 1   | 11          | 144.00( 90%) | 4            | 1          |
| 植物性脂肪组成变化比例     |                    |             |              |              |            |
| 实验组             | 组分比例               | 馒头/g        | 豆腐皮/g        | 粮油/g         | 包菜/g       |
| Z-1             | 11 : 4 : 1.78 : 1  | 55          | 20           | 8.90( 10%)   | 5          |
| Z-2             | 11 : 4 : 6.86 : 1  | 44          | 16           | 27.42( 30%)  | 4          |
| Z-3             | 11 : 4 : 16 : 1    | 44          | 16           | 64.00( 50%)  | 4          |
| Z-4             | 11 : 4 : 37.33 : 1 | 22          | 8            | 74.66( 70%)  | 2          |
| Z-5             | 11 : 4 : 144 : 1   | 11          | 4            | 144.00( 90%) | 1          |
| 纤维素类碳水化合物组成变化比例 |                    |             |              |              |            |
| 实验组             | 组分比例               | 馒头/g        | 豆腐皮/g        | 粮油/g         | 包菜/g       |
| X-1             | 11 : 4 : 4 : 0.19  | 22          | 8            | 8            | 0.38 ( 1%) |
| X-2             | 11 : 4 : 4 : 0.59  | 22          | 8            | 8            | 1.18( 3%)  |
| X-3             | 11 : 4 : 4 : 1     | 22          | 8            | 8            | 2.00( 5%)  |
| X-4             | 11 : 4 : 4 : 2.11  | 22          | 8            | 8            | 4.22( 10%) |
| X-5             | 11 : 4 : 4 : 2.59  | 22          | 8            | 8            | 5.18( 12%) |

## 2.3 流变特征的测量

**2.3.1 粘度测量** 本研究采用 Fungilab EVO 型旋转粘度计( 纺吉莱博科技有限公司) 测定剪切应力/粘度随剪切速率变化的流动曲线,选用 L3C 型转子,通过 XVISCO EVO 软件设定测量程序并记录数据,在 300 s 时间内,剪切速率从  $1 \text{ s}^{-1}$  升高到  $32 \text{ s}^{-1}$ . 测试温度为室温(  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ).为排除初始转动惯量的影响,数据分析截取剪切速率  $5 \sim 32 \text{ s}^{-1}$  范围内进行分析.

**2.3.2 模型拟合** Bingham 模型是描述非牛顿流体剪切速率与剪切应力之间关系的常用流变模型,本

研究选择 Bingham 模型来模拟不同物料的流动曲线,具体方程见式( 1 ).

$$\tau = \tau_B + \mu_B \nu \quad (1)$$

式中  $\tau$  为剪切应力( Pa );  $\tau_B$  为屈服应力( Pa );  $\mu_B$  为宾汉粘度(  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  );  $\nu$  为剪切速率(  $\text{s}^{-1}$  ).

## 3 结果与讨论( Results and discussion)

### 3.1 淀粉类碳水化合物对流变特征的影响

淀粉类碳水化合物物质组成比例变化对混合物料流变特征的影响如图 1 所示,随着剪切速率的增加,混合物料的粘度逐渐降低,剪切应力逐渐升

高,表现出假塑性流体的剪切稀化特性(曹立峰, 2016).在同等剪切速率下,随着碳水化合物组分比例的增加,混合物料的粘度增大,流动过程所需的剪切应力也增加.餐厨垃圾中主要的碳水化合物类物质来源于米饭、馒头、面条等主食,其中含有较多的淀粉类碳水化合物,具有糊化特征(徐敬欣等, 2019).淀粉糊化的本质是水分子进入淀粉颗粒内部并与其争夺氢键,使淀粉颗粒中有序或无序态的淀粉分子间的氢键断开,分散在水中并相互缠结成为胶体溶液(沈炜, 2013),表现为非牛顿流体.

淀粉主要由直链淀粉分子和支链淀粉分子组成.直链淀粉是在分子内氢键的作用下,将葡萄糖通过  $\alpha$ -D-1,4 糖苷键连接而成较长的线性分子,具有右手螺旋结构,葡萄糖残基的羟基处于螺旋结构的外部,内部是疏水空隙.而支链淀粉中除了  $\alpha$ -D-1,4

糖苷键外,还有 5%的葡萄糖是以  $\alpha$ -D-1,6 糖苷键相连形成的侧链分支,因此支链淀粉具有高度分支结构(范玉艳等, 2018).原淀粉中直链和支链淀粉分子并不是以松散的个体形式存在,而是通过分子链内和链间的氢键连接形成高度有组织的颗粒结构(杨洁等, 2019).研究发现,大米淀粉凝胶、马铃薯淀粉糊、板栗淀粉均属于假塑性非牛顿流体,具有剪切稀化特性(聂卉等, 2019; 肖悦等, 2020).淀粉样品中的分子链相互缠绕,妨碍了淀粉分子的运动,当受到剪切应力作用时,缠绕的分子链被拉直,分子结构松散,分子缠结点减少,对流动产生的粘性阻力减小,从而使粘度下降;当淀粉含量增大时,大分子数增加,分子链更易缠结,粘性阻力更大,因此随着淀粉类碳水化合物物质比例的增加,混合物料粘度增大(聂卉等, 2019).

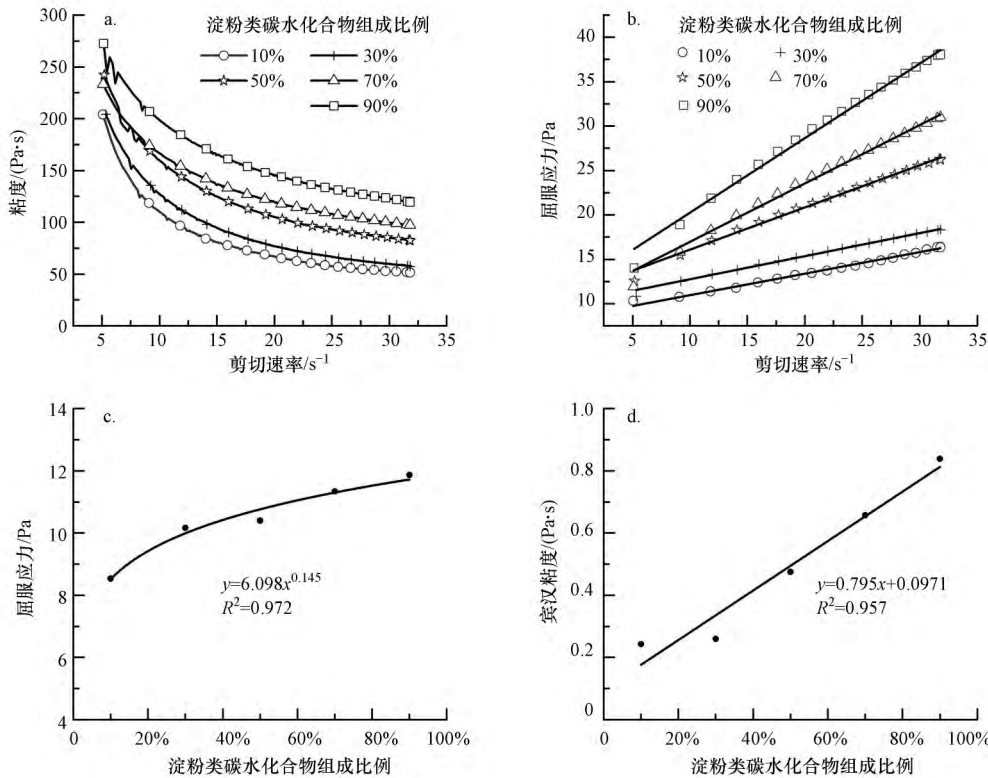


图 1 淀粉类碳水化合物组成比例对流变特征的影响

Fig.1 Effect of starch carbohydrate composition ratio on rheological behaviors

用 Bingham 模型拟合不同淀粉类碳水化合物组成比例下混合物料的流动曲线,其拟合结果如表 2 所示,拟合曲线如图 1b 所示.所有混合物料的 Bingham 模型拟合决定系数  $R^2$  均在 0.99 以上,表现出较高的拟合精度.其中  $\tau_B$  表示屈服应力,可以直接反应混合体系的流动性差异. $\mu_B$  表示宾汉粘度,其

不随剪切速率变化. $\mu_B$  值越大,混合体系越粘稠. $\tau_B$  和  $\mu_B$  随着碳水化合物物质比例的变化分别如图 1c、1d 所示. $\tau_B$  与碳水化合物呈幂律关系增大, $\mu_B$  随碳水化合物呈线性关系增加.淀粉类碳水化合物组成比例越大, $\mu_B$  增大越显著,而  $\mu_B$  的增大通常与表现粘度的增大呈正相关. $\tau_B$  和  $\mu_B$  的增大表明,随着淀粉

类碳水化合物比例的增加, 混合物料的非牛顿流体 特性增强, 流动性能变差.

表 3 不同有机组成下混合物料流变特征的 Bingham 模型模拟结果

Table 3 Bingham model simulation results of rheological behaviors of mixed materials with different organic compositions

| 组成        | 比例       | Bingham 模型: $\tau = \tau_B + \mu_B \nu$ |        |        |        |        |
|-----------|----------|---|--------|--------|--------|--------|
|           |          | 10%                                     | 30%    | 50%    | 70%    | 90%    |
| 淀粉类碳水化合物  | $\tau_B$ | 8.537                                   | 10.167 | 11.342 | 10.399 | 11.864 |
|           | $\mu_B$  | 0.242                                   | 0.260  | 0.475  | 0.657  | 0.839  |
|           | $R^2$    | 0.995                                   | 0.997  | 0.995  | 0.994  | 0.994  |
| 豆制品类蛋白质   | $\tau_B$ | 11.466                                  | 9.736  | 8.542  | 7.341  | 5.688  |
|           | $\mu_B$  | 0.563                                   | 0.429  | 0.301  | 0.212  | 0.161  |
|           | $R^2$    | 0.991                                   | 0.994  | 0.990  | 0.996  | 0.994  |
| 植物性脂肪     | $\tau_B$ | 18.929                                  | 6.081  | 3.543  | 2.018  | 0.001  |
|           | $\mu_B$  | 0.925                                   | 0.270  | 0.089  | 0.067  | 0.185  |
|           | $R^2$    | 0.993                                   | 0.994  | 0.995  | 0.962  | 0.854  |
| 纤维素类碳水化合物 | 比例       | 1%                                      | 3%     | 5%     | 10%    | 12%    |
|           | $\tau_B$ | 5.856                                   | 7.460  | 10.517 | 19.311 | 27.477 |
|           | $\mu_B$  | 0.297                                   | 0.405  | 0.462  | 0.811  | 1.105  |
|           | $R^2$    | 0.984                                   | 0.988  | 0.990  | 0.991  | 0.995  |

3.2 豆制品类蛋白质对流变特征的影响  
豆制品类蛋白质物质组成变化对混合物料流

变特征的影响如图 2 所示, 随着剪切速率的增加, 混合物料的粘度逐渐降低, 混合物料整体表现为假塑

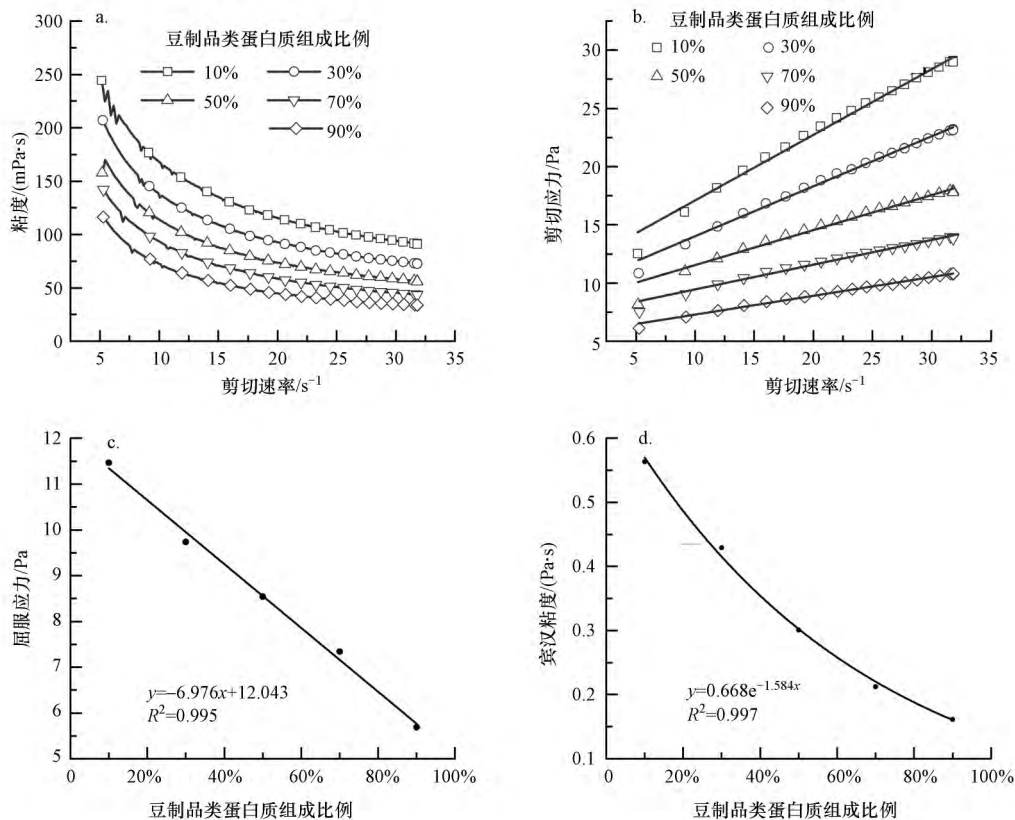


图 2 豆制品类蛋白质组成比例对流变特征的影响

Fig.2 Effect of protein composition ratio of bean products on rheological behaviors

性流体的剪切稀化特性.但在同等剪切速率下,随着蛋白质组成比例的增加,混合物料粘度降低,流动过程所需的剪切应力也减少.这与碳水化合物类组分对混合物料流变特征的影响不同.餐厨垃圾中的蛋白质类物质主要来源于瘦肉、鱼肉、豆类等物质.通常,蛋白质溶液在低剪切速率或者悬浮状态下往往会发生缠绕和絮凝,增加蛋白质与流体之间的阻力,表现为高粘度的性质;当剪切速率增加时,速率梯度增加,剪切应力也随之增大,缠绕在一起的蛋白质会发生解体或者变形,依靠微弱作用形成的二聚体或低聚体解离成单体,流动阻力降低,出现剪切稀化现象(王教飞等,2015).但是本研究所选用的豆腐皮为经过热处理加工后的豆类蛋白质,由于热处理过程蛋白质发生变性,蛋白质分子在加热变性过程中通过疏水键与脂肪结合形成了大豆蛋白质-脂类薄膜(黄伟,2008).蛋白质的变性可能降低了原始蛋白质溶液分子间的缠绕等相互作用,成为相对独立的单体.因此,变性后蛋白质组分的比例增加,蛋白质单体占据空间位,反而阻隔了混合物料中其他有机组分间的缠结作用,导致混合物料粘度

反而降低.相关研究同样表明,随着大豆蛋白含量的升高,大豆蛋白/粘胶共混流体的非牛顿指数变小,共混流体的表观粘度降低(尹翠玉等,2005).

用 Bingham 模型拟合不同豆制品类蛋白质组成混合物料流变特征的流动曲线,其拟合结果如表 2 所示.拟合曲线如图 2b 所示.其中  $\tau_B$  和  $\mu_B$  随着蛋白质类物质比例的变化分别如图 2c、2d 所示.混合物料的  $\tau_B$  随蛋白质比例增加呈线性降低,  $\mu_B$  则随蛋白质比例增加呈指数降低.蛋白质的比例越小,  $\mu_B$  减小的程度越显著.  $\tau_B$  和  $\mu_B$  的减小表明随着变性豆制品蛋白质比例的增加,混合物料的非牛顿流体特性减弱,流动性能变好.

### 3.3 植物性脂肪对流变特征的影响

植物性脂肪组成比例变化对餐厨垃圾混合物料流变特征的影响如图 3 所示.当脂肪所占比例为 10%、30%、50% 时,随着剪切速率的不断增大,混合物料的粘度逐渐降低,剪切应力逐渐升高,表现出假塑性流体的剪切稀化特性.但当脂肪比例达到 70% 时,混合物料的粘度随剪切速率增大而降低的趋势较缓慢,剪切应力变化较平缓,说明混合体系

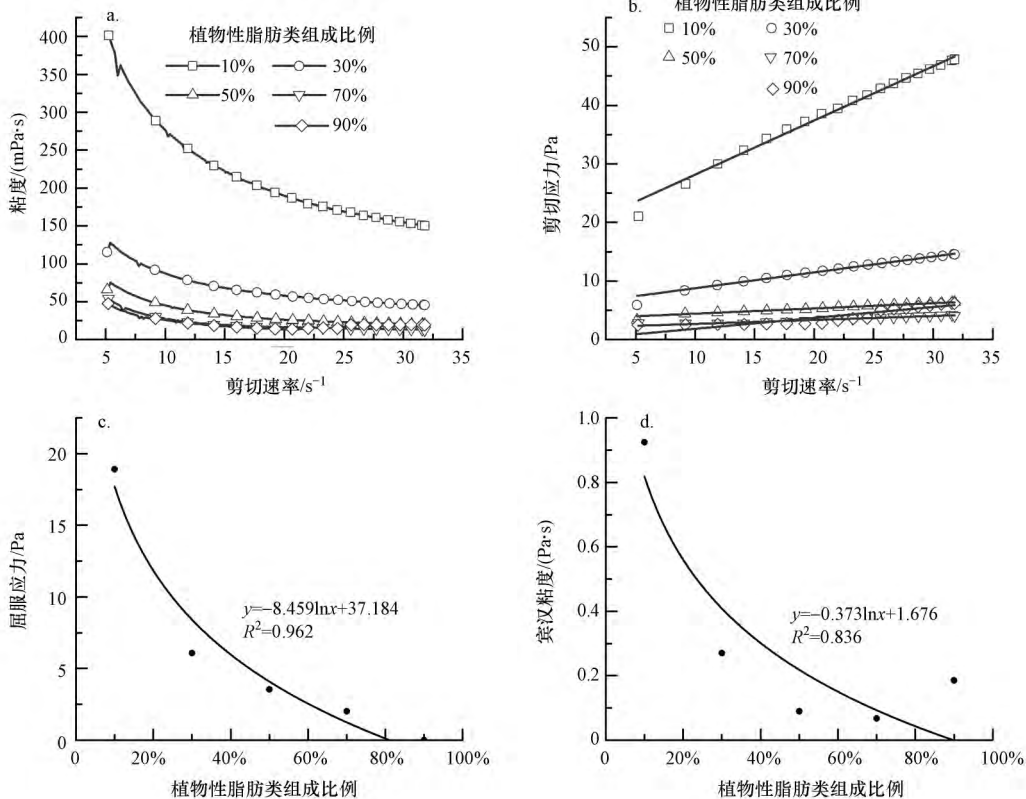


图 3 植物性脂肪组成比例对流变特征的影响

Fig.3 Effect of plant fat composition ratio on rheological behaviors

所属流体类型由非牛顿流体向牛顿流体转变.在同等剪切速率下,随着脂肪组成比例的增加,混合体系的粘度降低,流动过程所需的剪切应力也减少.餐厨垃圾中的脂肪类物质主要来源于一些粮油和动物脂肪.而相关研究分析均表明,粮油是牛顿流体,其粘度不随剪切速率变化(杨春英等,2013).

用 Bingham 模型拟合不同植物性脂肪组成比例下混合物料的流动曲线,其拟合结果如表 2 所示,拟合曲线如图 3b 所示.当脂肪比例为 10%、30%、50% 时,混合体系的决定系数  $R^2$  均在 0.99 以上,表现出较高的拟合精度;但当脂肪比例达到 70%、90% 时,该模型对混合体系的拟合效果较差.其中  $\tau_B$  和  $\mu_B$  均随脂肪组成比例增加呈对数降低.脂肪的比例越小  $\mu_B$  减小的程度越显著. $\tau_B$  和  $\mu_B$  的减小表明随着植物性脂肪比例的增加,混合体系的非牛顿流体特性减弱,流动性能变好,混合物料流变特征向牛顿流体转变.

### 3.4 纤维素类碳水化合物对物料流变特征的影响

不同纤维素类碳水化合物组成下混合物料随着剪切速率的不断增加,粘度逐渐降低,剪切应力

逐渐升高,同样表现出假塑性流体的剪切稀化特性(图 4).在同等剪切速率下,随着纤维素类物质比例的增加,混合体系粘度增大,流动过程所需的剪切应力也增加.纤维素是由 D-葡萄糖以  $\beta$ -1,4 糖苷键连接而成的链状高分子化合物,成束的链状纤维素进一步聚集构成纤维素纤维,纤维素混合体系中存在两种交联点,即因分子间氢键作用而在纤维素大分子间、纤维素大分子与溶剂分子间形成的交联点,以及因范德华力和物理缠结作用而在纤维素大分子链间形成的交联点.纤维素混合体系中所有的交联点由于分子热运动而处于不断解体和重建状态(李金宝等,2015).随着剪切速率增大到一定值时,混合体系中大分子交联点的解体速度大于重建速度,体系中的交联点减少,纤维素大分子间的相互阻力降低,相对运动加速,所以混合体系的流动阻力减小,粘度降低.随着混合体系中纤维素比例的增加,混合体系中大分子交联点的解体速度小于重建速度,体系中的交联点增加,纤维素大分子间的相互阻力升高,相对运动减速,所以混合体系的流动阻力增大,粘度升高.

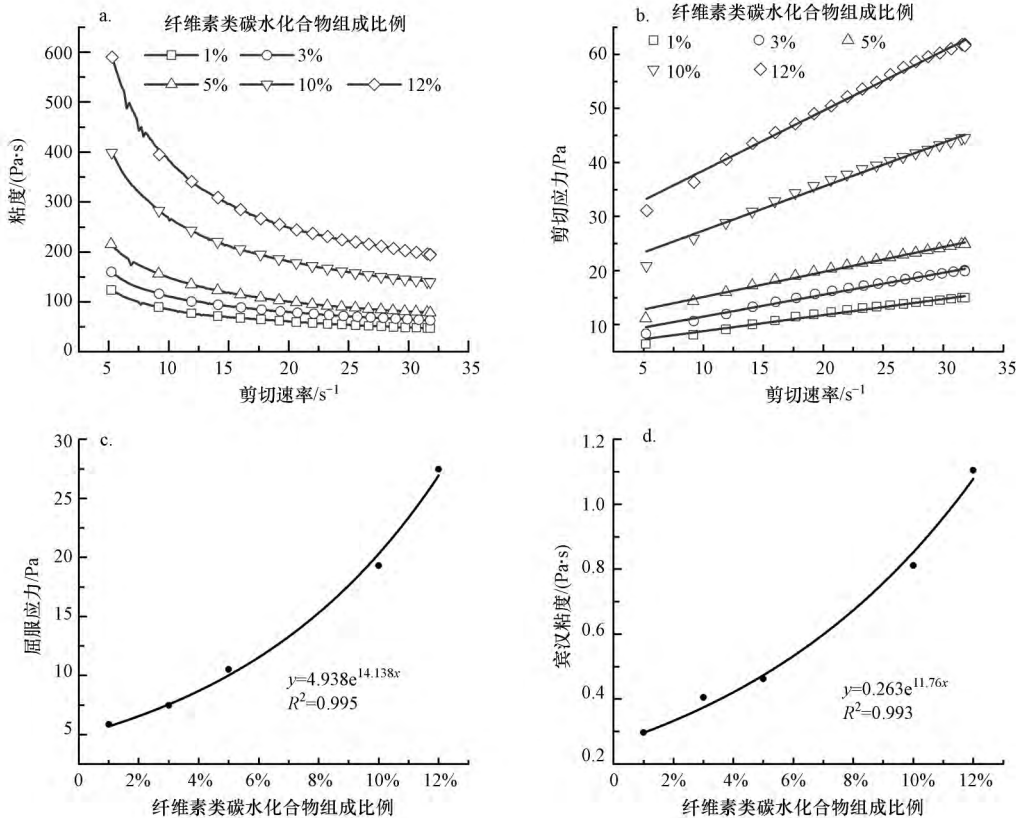


图 4 纤维素类碳水化合物组成比例对流变特征的影响

Fig.4 Effect of cellulose carbohydrate composition ratio on rheological behaviors

通过 Bingham 模型拟合分析,所有混合体系的方程拟合决定系数  $R^2$  均在 0.98 以上,表现出较高的拟合精度(表 2)。 $\tau_B$  和  $\mu_B$  随着纤维素比例增加均呈指数关系增加,这与 Miryahyaei 等(2020)的研究结果相一致。纤维素比例越大,  $\mu_B$  增大越显著。因此,随着纤维素类碳水化合物比例的增加,混合物料的非牛顿流体特性增强,流动性能变差。

基于上述分析,不同有机组成的餐厨垃圾即使在相同的含固率情况下,其流变特征随不同类型有机物组成差别而显著不同,流变特性呈完全不同的变化规律,这种影响差异与不同类型有机物本身的分子结构特征直接相关。总体而言,由于淀粉类碳水化合物分子间强的缠结作用,组分比例的增加将增大餐厨垃圾的粘度,使屈服应力和宾汉粘度分别呈指数( $\tau_B = 6.098x^{0.14}$ )和线性关系( $\mu_B = 0.795x + 0.0971$ )增长;热加工后的豆类蛋白质由于蛋白质分子的变形与解体,组分比例增加反而降低餐厨垃圾粘度,使屈服应力和宾汉粘度分别呈线性( $\tau_B = 6.976x + 12.043$ )降低和指数( $\mu_B = 0.668e^{-1.584x}$ )降低;粮油类脂肪由于本身表现为牛顿流体特征,其比例的增加降低餐厨垃圾粘度,屈服应力和宾汉粘度均呈对数降低( $\tau_B = 8.459\ln x + 37.184$ 和 $\mu_B = 0.373\ln x + 1.676$ );而蔬菜类纤维类碳水化合物组分由于分子间存在较强的交联作用,其比例的增加将增大餐厨垃圾粘度,屈服应力和宾汉粘度均呈指数关系( $\tau_B = 4.938e^{14.138x}$ 和 $\mu_B = 0.263e^{11.76x}$ )增加。

### 3.5 不同组分流变特征差异对高含固厌氧消化潜在影响

已有研究表明,物料流变特征是影响物料管道输送、反应器流场和搅拌设计的关键参数(曹秀芹等,2017;尹伟齐等,2017;曹秀芹等,2018;彭爽等,2017)。由于不同组分下餐厨垃圾流变特征的变化规律差异,淀粉类和纤维素类碳水化合物组分比例增加会增加餐厨垃圾的粘度、屈服应力等流变特征,因此,针对这类组分比例较高的餐厨垃圾,应当考虑合适的含固率阈值,从而不影响反应器的搅拌、传质。对于豆制品类蛋白质、植物性脂肪,这类组分比例增加会降低餐厨垃圾的粘度、屈服应力等流变特征,针对这类组分比例较高的餐厨垃圾,可以考虑更高含固率下的厌氧消化。

但这种不同组分下餐厨垃圾流变特征差异所决定的合理的含固率区间仍需要进一步来研究,这对明确不同组成类别下餐厨垃圾高含固甚至干式

厌氧消化物料组成、含固率调节以及反应器本身搅拌系统的优化设计至关重要。

不同有机组成餐厨垃圾这种差异化的流变特征除了在未来的反应器优化设计中需要注意外,这种流变特征的差异也将直接影响厌氧消化的产甲烷动力学过程。Miryahyaei 等(2019)研究了底物流变特征对厌氧消化和消化污泥脱水性的影响,指出流变特征不同的 5 种污泥其累积产甲烷量不同,在整个厌氧消化过程中粘度最小的污泥产甲烷情况优于其它污泥,其中粘度为  $\mu = 0.66 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  的污泥累积产甲烷量最高为  $230.4 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ,其次粘度  $\mu = 0.80 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  的污泥累积产甲烷量为  $208.5 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而粘度为  $\mu = 1.15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  的污泥累积产甲烷量最低为  $155.8 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。同时, Miryahyaei 等(2020)研究了 4 种 TS 和流变性能不同的污泥厌氧消化的性能,指出厌氧消化水解速率与流变性之间存在相关性,其中水解速率随着流动稠度指数、屈服应力和粘弹性模量的增加而线性降低。

## 4 结论(Conclusions)

1) 淀粉类碳水化合物由于淀粉分子链内和链间的氢键相互缠结,比例增加,餐厨垃圾粘度增大,屈服应力随淀粉类比例呈幂律关系增加,宾汉粘度随淀粉类比例呈线性关系增加。

2) 变性后豆类蛋白质由于蛋白质变性解体,比例增加反而降低餐厨垃圾的粘度,屈服应力随蛋白质比例呈线性降低,而宾汉粘度随蛋白质比例呈指数下降。

3) 植物性脂肪由于其本身表现为牛顿流体,其比例的增加将导致餐厨垃圾向牛顿流体转变,屈服应力和宾汉粘度均随脂肪比例增加呈对数降低。

4) 纤维素类碳水化合物由于本身分子间的交联作用,其比例的增加将增大餐厨垃圾粘度,并且屈服应力和宾汉粘度随纤维素比例呈指数关系增加。因此,餐厨垃圾高含固厌氧消化应当考虑不同组分组成比例下的流变特征变化规律的差异,合理确定不同组成餐厨垃圾实现反应器内有效搅拌传质、高效产甲烷的适宜含固率。

### 参考文献(References):

- Baroutian S, Munir M T, Sun J, et al. 2018. Rheological characterisation of biologically treated and non-treated putrescible food waste [J]. Waste Management, 71: 494-501
- Campuzano R, González-Martínez S. 2016. Behaviors of the organic fraction



- of municipal solid waste and methane production: A review [J]. *Waste Management* 54: 3-12
- 曹立峰, 李茹莹, 季民. 2016. 污泥厌氧消化系统消化原料流变特性研究 [J]. *环境科学学报* 36(4): 1279-1285
- 曹秀芹, 丁浩, 蒋竹荷, 等. 2018. 液-液射流搅拌提高热水解污泥混合性能分析 [J]. *环境工程学报* 12(1): 316-323
- 曹秀芹, 王鑫, 蒋竹荷, 等. 2017. 热水解污泥流变特性及其对管道摩阻计算的影响 [J]. *中国给水排水* 33(15): 89-93
- Diamante L, Umemoto M. 2015. Rheological properties of fruits and vegetables: A review [J]. *International Journal of Food Properties* 18(6): 1191-1210
- 范玉艳, 于双双, 马成业. 2018. 不同直链淀粉含量玉米淀粉挤出物的酶解力与糊化度研究 [J]. *食品工业科技* 39(10): 1-6
- 黄伟. 2008. 豆腐皮生产过程关键工艺的优化和品质改进研究 [D]. 杭州: 浙江大学. 75
- Karthikeyan O P, Visvanathan C. 2013. Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: A review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology* 12(3): 257-284
- Kim M, Sivagurunathan P, Lee M, et al. 2018. Rheological properties of hydrogen fermented food waste [J]. *International Journal of Hydrogen Energy* 44(4): 2239-2245
- Kothari R, Pandey A, Kumar S, et al. 2014. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39: 174-195
- 李金宝, 杨国鑫, 余伟燕, 等. 2015. 影响 NMMO 纤维素溶液流变性的因素 [J]. *造纸科学与技术* 34(2): 31-34
- Liu J, Yu D, Zhang J, et al. 2016. Rheological properties of sewage sludge during enhanced anaerobic digestion with microwave-H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> pretreatment [J]. *Water Research* 98: 98-108
- Meng X, Yu D, Wei Y, et al. 2018. Endogenous ternary pH buffer system with ammonia-carbonates-VFAs in high solid anaerobic digestion of swine manure: An alternative for alleviating ammonia inhibition? [J]. *Process Biochemistry* 69: 144-152
- Miryahyaei S, Das T, Othman M, et al. 2020. Anaerobic co-digestion of sewage sludge with cellulose, protein, and lipids: Role of rheology and digestibility [J]. *Science of the Total Environment* 731: 139214
- Miryahyaei S, Olinga K, Abdul M F, et al. 2019. Impact of rheological properties of substrate on anaerobic digestion and digestate dewaterability: New insights through rheological and physico-chemical interaction [J]. *Water Research* 150: 56-67
- Miryahyaei S, Olinga K, Ayub M, et al. 2020. Rheological measurements as indicators for hydrolysis rate, organic matter removal, and dewaterability of digestate in anaerobic digesters [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(4): 103970
- 聂卉, 张云飞, 李坚斌. 2019. 超声场中马铃薯淀粉糊剪切稀化及触变规律研究 [J]. *食品工业* 40(1): 142-146
- 彭爽, 何琴, 李蕾, 等. 2017. 底物和中间产物对餐厨垃圾厌氧消化污泥表面张力、黏度和发泡潜能的影响 [J]. *环境科学学报* 37(10): 3845-3852
- 乔子茹, 魏华炜, 马佳莹, 等. 2020. 餐厨垃圾生物处理过程中 VOCs 的产生与控制研究进展 [J]. *应用与环境生物学报* 26(1): 210-216
- 沈炜. 2013. 热处理对淀粉结构及理化性质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学. 56
- 唐琳钦, 宿程远, 赵力剑, 等. 2020. 不同基质生物炭对厌氧处理餐厨垃圾效能及微生态的影响 [J]. *中国环境科学* 40(11): 4831-4840
- 王教飞, 黄友如, 钱雅萍, 等. 2015. 芋艿分离蛋白质的流变特性 [J]. *食品科学* 36(9): 17-21
- 王凯军, 王婧瑶, 左剑恶, 等. 2020. 我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状分析及建议 [J]. *环境工程学报* 14(7): 1735-1742
- 肖悦, 刘敏, 刘金光, 等. 2020. 黄变对大米流变特性以及内部结构的影响 [J]. *食品科学* 41(11): 22-27
- 徐敬欣, 冯扬扬, 于栋, 等. 2019. 淀粉糊化度测量方法研究进展 [J]. *食品工业科技* 40(22): 334-339
- 杨春英, 刘学铭, 陈智毅, 等. 2013. 食用粮油流变学特性研究 [J]. *中国粮油学报* 28(8): 24-27
- 杨洁, 顾正彪, 洪雁. 2019. 淀粉结构对其性能的影响及淀粉性能的调控 [J]. *食品安全质量检测学报* 10(23): 7862-7868
- 尹翠玉, 张瑞文, 刘赤乾, 等. 2005. 大豆蛋白/粘胶共混流体的流变性能 [J]. *纤维素科学与技术* 13(3): 35-38
- 尹伟齐, 曹秀芹, 张达飞. 2017. 猪粪流变特性及基于黏度曲线的反应器死区研究 [J]. *中国沼气* 35(3): 27-32
- 张鹏帅. 2018. 餐厨垃圾代表性组分厌氧发酵产酸耦合 MEC 产氢研究 [D]. 福州: 福建师范大学. 125
- 朱慧. 2019. 餐厨垃圾及组分对几种常见微生物生长的影响 [D]. 南京: 南京大学. 55