

厨余垃圾、秸秆、沼渣协同高温厌氧消化产甲烷特性研究

鲁晓菊¹, 杨迪^{1*}, 姚俊花¹, 张继龙²

(1. 太原市环卫产业管理中心, 山西 太原 030002; 2. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为探索我国厨余垃圾分类末端处理技术, 提高生活垃圾分类处理效率, 以生活垃圾分类中的厨余垃圾、秸秆、餐厨垃圾厌氧消化沼渣为原料, 通过正交试验调节3种物料有机负荷配比, 在 $55^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 下进行高温厌氧消化反应, 对物料不同有机负荷配比产甲烷量进行了分析。结果表明: 高温厌氧消化处理时间明显比中温厌氧消化时间缩短, 提高了生活垃圾分类后厨余垃圾的厌氧消化处理效率。在设定的进样有机负荷下, 3种物料对高温厌氧消化甲烷产气量的影响程度为: 沼渣 > 厨余垃圾 > 秸秆, 沼渣和厨余垃圾进样量对高温厌氧消化甲烷产气量影响显著, 秸秆进样量影响不显著。在实际实验过程中原料宜取的最佳有机负荷配比为沼渣: 厨余垃圾 = 3: 2; 秸秆可根据系统稳定性选择配比, 所选最佳物料有机负荷配比为沼渣: 秸秆: 厨余垃圾 = 3: 3: 2。

关键词: 生活垃圾分类; 厨余垃圾; 协同; 高温厌氧消化; 产甲烷; 配比

中图分类号: F323.22; S216.4; X705 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2022)06-0037-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022060037

Methane Production Performance of Food Waste in Thermophilic Anaerobic Digestion with Straw and Biogas Residue / LU Xiaojun¹, YANG Di^{1*}, YAO Junhua¹, ZHANG Jilong² / (1. Taiyuan Environmental Sanitation Industry Management Center, Taiyuan 030002, China; 2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to explore the technology of tail end treatment of food waste classification in China and improve the efficiency of household waste classification treatment, the organic load ratio of food waste in classification of municipal solid waste, straw and biogas residue had been adjusted by orthogonal test on the condition that the thermophilic anaerobic digestion was carried out at $55^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ in this experiment. The methane production of materials under different organic load ratio was analyzed. The research shows that the time of thermophilic anaerobic digestion treatment is obviously shortened than mesophilic anaerobic digestion, and it improves the processing capacity on food waste. Under the set sampling organic load, the ranking of influence on the methane gas production by thermophilic anaerobic digestion is as follows: biogas residue > food wastes > straw. Furthermore, biogas residue and food waste had a significant effect on the methane yields in the experiment, while the straw had not. It is found that the most optimal ratio of raw materials is biogas residue: food waste = 3: 2 in practice, and the straw ratio can be selected according to system stability, the best experimental mixture ratio selected in the experiment is biogas residue: straw: food waste = 3: 3: 2.

Key words: municipal solid waste classification; food waste; collaborate; thermophilic anaerobic digestion; methane production; proportion

近年来,我国各地区在推进生活垃圾分类工作方面取得重大进展,为我国建设“无废城市”,推动生态文明建设和提高社会文明水平发挥了积极的作用^[1]。住房和城乡建设部新修订的《生活垃圾分类标志》^[2](GB/T19095—2019)中将我国生活垃圾分

为可回收物、有害垃圾、厨余垃圾和其他垃圾四大类。其中厨余垃圾表示易腐烂的、含有机质的生活垃圾,包括家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他厨余垃圾等。本文研究对象厨余垃圾是指除餐厨垃圾外的家庭厨余垃圾和来自于农贸市场、农产品批发市场产

收稿日期: 2022-04-06 修回日期: 2022-05-07

项目来源: 山西省重点研发计划项目(201803D31002)

作者简介: 鲁晓菊(1986-),女,汉族,山西太原人,工程师,主要从事固体废物资源化利用与研究等工作, E-mail: 18734138521@163.com

通信作者: 杨迪, E-mail: 13593132536@163.com

生的蔬菜瓜果垃圾、腐肉、肉碎骨、蛋壳、畜禽产品内脏等其他厨余垃圾。随着国家政策的完善和各地垃圾分类体系的建立,餐厨垃圾分类处理技术日渐成熟,截至2019年5月,我国在建和投产餐厨垃圾项目总设计处理规模达到 $35\,955\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ [3]。但厨余垃圾主要组成部分家庭厨余垃圾和其他厨余垃圾并未得到很好的分类处理。厨余垃圾的分类处理仍是我国生活垃圾分类的难点、焦点和痛点[4]。调查显示,目前我国46个垃圾分类重点城市厨余垃圾集约化处理能力仍不足5%,处理缺口巨大[5]。基于厨余垃圾含水率高、易腐烂、处理难度大的特点,许多城市厨余垃圾分类末端处理正处于研究和探索阶段,因此加快探索适合我国厨余垃圾特性的处理技术路线,鼓励各地因地制宜选用厨余垃圾处理工艺来提升生活垃圾资源化水平利用就显得尤为重要。

目前我国生活垃圾分类分出的厨余垃圾除少量采用好氧堆肥、转化饲料等模式处理外,大部分厨余垃圾仍是与其他垃圾混合,最终进入到焚烧厂或填埋场进行处理[6]。厨余垃圾焚烧处理,一方面由于厨余垃圾含水率高,难以直接点燃焚烧,需添加辅助燃料,处理成本高。另一方面,厨余垃圾成分复杂,焚烧会产生粉尘颗粒、二噁英等污染物,造成大气环境污染。而且厨余垃圾直接焚烧也未能有效利用其营养物质,无法满足垃圾资源化处理的要求。厨余垃圾填埋处理也存在诸多不足,厨余垃圾的自然发酵腐败过程不仅会产生大量恶臭气体,滋生大量蚊蝇,对周围环境造成影响,还会增加填埋场渗滤液的产生量,加大填埋场运行成本。垃圾填埋存在土地资源紧缺、容量有限、选址困难等突出问题,目前我国大部分地区已逐步禁止厨余垃圾进入填埋场处理[7-8]。对厨余垃圾进行厌氧消化处理,不仅可以利用微生物的分解代谢活动降解厨余垃圾中的有机物,同时还可对其分解代谢过程中产生的沼气进行净化提纯获取生物质燃气。厨余垃圾厌氧消化技术在处理厨余垃圾的同时,可获取各种有效能源,具备很大的碳减排潜力,是一种很有潜质的环保新技术,将逐渐成为未来厨余垃圾处理的研究方向。

厨余垃圾的糖分和淀粉含量高且易水解,单独厌氧消化易发生酸化[9],若与秸秆、稻草等高纤维素含量有机固体协同处理,将有利于反应体系的营养均衡,调节物料碳氮比(C/N)达到适宜厌氧消化的范围20~30,进而提高系统稳定性,实现较高产甲烷潜力与物料降解率[10],蒋滔[11]等、刘月玲[12]

等、Wang[13]等观察到,两种以上物料协同厌氧消化具有长期连续稳定性,并能获得较好的甲烷产率。餐厨垃圾厌氧消化处理过程中会产生大量沼渣,其成分主要是未分解的固态发酵物质和新产生的菌体等,是高效的厌氧消化接种物。沼渣有机物含量高,富含大量腐殖酸和微量元素,如果不加以妥善处置可能会产生恶臭、病原微生物污染等二次污染[14]。若将厨余垃圾与秸秆、沼渣协同进行厌氧消化反应,既能提高厌氧消化处理效率,又能消纳有机固体废物,从而提高垃圾分类终端处理效率和垃圾资源化水平,减轻生态环境负担。

研究表明:中温厌氧消化甲烷停留时间大多在20~30 d,而高温消化大多只需10~15 d[15]。郭香麟[16]等研究发现,高温条件下物料中的碳流向甲烷的比例高于中温。高温厌氧消化具有水解速率高、反应速度快、产气率高、有机物降解彻底、病原菌灭活率高等特点,适用于处理高有机质、组分复杂的家庭厨余垃圾和纤维素、木质素含量高的农贸市场废弃物[17-19]。本文利用正交法对典型垃圾分类居民小区和农贸市场收集的厨余垃圾,协同秸秆和餐厨垃圾处理后的沼渣进行高温厌氧消化反应,通过研究其产甲烷性能探索物料最佳产气有机负荷配比,旨在为厨余垃圾处理设施的建设提供可行的处理方案和工艺参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

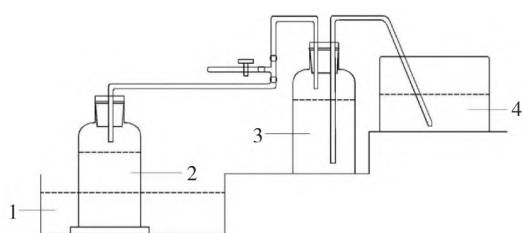
本试验于2019年~2021年期间在实验室内进行多次试验。厌氧消化原料为厨余垃圾、秸秆及沼渣。厨余垃圾为太原市某典型垃圾分类小区及3个农贸市场废弃蔬菜用破碎机破碎处理后的混匀物,秸秆为太原市阳曲县风干的玉米秸秆采用粉碎机粉碎并过20目筛,沼渣为太原市某餐厨垃圾处理厂中温($35\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$)厌氧消化处理后排放的沼渣,进样当天取用。厌氧消化原料的理化性质见表1。

1.2 试验装置

厌氧消化批式实验装置为实验室自行设计,主要由恒温水浴、1 L厌氧反应瓶、1 L带刻度集气瓶(即广口瓶)和3 L集水装置组成,反应温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中1 L厌氧反应瓶,工作有效体积为0.8 L,采用排水法收集气体,集气瓶上标计刻度来计量日产气量。实验装置见图1。

表1 厌氧消化原料的理化性质

参数	沼渣	玉米秸秆	厨余垃圾
pH 值	7.92	6.86	5.27
TS/%	21.67	93.08	24.28
VS/%	88.49	80.90	77.69
C/%	15.42	22.00	24.23
H/%	1.56	0.76	2.42
O/%	41.62	70.30	65.11
N/%	1.65	0.99	1.94
S/%	0.48	0.12	0.23
Cl/%	0.009	0.018	0.013
C/N	9.35	22.22	12.49



1. 恒温水浴; 2. 1 L 厌氧反应瓶; 3. 1 L 带刻度集气瓶; 4. 集水箱

图1 试验装置

1.3 试验方法

试验所用沼渣没有按传统试验把其作为接种物使用,而是和厨余垃圾、秸秆一起作为厌氧消化原

料进入反应瓶。根据反应瓶体积,预先设定厨余垃圾、秸秆、沼渣3种物料有机负荷均有 20 gTS·L⁻¹d⁻¹、40 gTS·L⁻¹d⁻¹、60 gTS·L⁻¹d⁻¹这3个梯度,然后根据厨余垃圾、秸秆、沼渣总固体含量(TS)分别计算出物料进料质量(g),采用正交实验法设计物料有机负荷配比(见表2),同时设置3组单一沼渣物料做空白对照实验。正交实验设计以厨余垃圾、秸秆、沼渣3种物料为试验因素,每个因素设置有机负荷 20 gTS·L⁻¹d⁻¹、40 gTS·L⁻¹d⁻¹、60 gTS·L⁻¹d⁻¹3个水平,按照 L₉(3⁴) 正交表安排试验,共设置9组,将甲烷产气总量及单位 TS 产甲烷量作为衡量指标,正交实验的因素和水平设计见表3。物料进料后,加水至 0.8 L 体积刻度处,调节物料总质量为 800 g,搅拌均匀测得 pH 值后将反应瓶放置于恒温水浴中,观察产气情况并记录日产气量,试验结果需减去空白值甲烷产气量。每天摇晃 1~2 次反应瓶,起搅拌作用。

表2 正交试验因素和水平设计 (gTS·L⁻¹d⁻¹)

水平	因素		
	沼渣有机负荷	秸秆有机负荷	厨余垃圾有机负荷
1	20	20	20
2	40	40	40
3	60	60	60

表3 正交设计与物料有机负荷配比

试验编号	沼渣	秸秆	厨余垃圾	物料有机负荷/(gTS·L ⁻¹ d ⁻¹)			pH 值
				沼渣	秸秆	厨余垃圾	
1	1	1	1	20	20	20	7.32
2	1	2	2	20	40	40	7.01
3	1	3	3	20	60	60	6.88
4	2	1	2	40	20	40	7.19
5	2	2	3	40	40	60	6.94
6	2	3	1	40	60	20	7.32
7	3	1	3	60	20	60	7.07
8	3	2	1	60	40	20	7.37
9	3	3	2	60	60	40	7.18

2 结果与分析

2.1 不同物料有机负荷配比协同高温厌氧消化反应日产甲烷量分析

图2为厨余垃圾、秸秆、沼渣协同高温厌氧消化日产甲烷量。可以看出,以发酵周期为 35 d 计算,

不同物料有机负荷配比的反应器日产甲烷量的首个峰值均出现在 12 d 左右,第2个峰值出现在 19 d 左右,第3个峰值出现在 25 d 左右,峰值的间隔时间不断缩短,而产甲烷最高峰值均出现在 19 d 左右。周祺^[19]等人研究餐厨垃圾与玉米秸秆联合厌氧消化试验中采用中温厌氧消化试验产甲烷量,首个峰值出

现时间为 $23 \text{ d} \pm 1 \text{ d}$ 本试验中高温厌氧消化产甲烷量首个峰值的出现时间平均要比普通中温厌氧消化产甲烷量首个峰值出现的时间早 10 d 左右,处理时间明显缩短,这对厨余垃圾的高速处理作用明显。

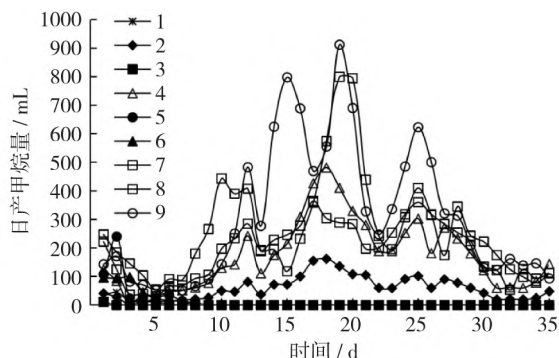


图2 日产甲烷量

2.2 不同物料有机负荷配比协同高温厌氧消化反应累积产甲烷量

图3为厨余垃圾、秸秆、沼渣协同高温厌氧消化累积产甲烷量。可以看出,试验序号为8的反应器最先开始产甲烷,物料调整时间为3天左右,4、7、9号反应器经过约5天调整后迅速开始产甲烷,而其他反应器则产甲烷不明显。可能是因为本试验反应温度为 $55^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,同为原料和接种物的沼渣是经过 35°C 餐厨垃圾厌氧发酵后的废弃物,主要包含的产甲烷菌为中温产甲烷菌,随着温度的上升,1、2、3、5、6号反应器物料有机负荷配比不适宜菌群驯化,有部分中温菌种无法适应高温环境,出现致死情况,因此产气量较低^[20]。而4、7、8、9号反应器物料有机负荷配比适宜菌种驯化,其产气性能较好。本实验采用中温产甲烷菌接种物,通过调节物料有机负荷配比,使其在高温 ($55^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) 环境中反应,菌种逐步适应高温反应温度,由此可探索出一套高温产甲烷菌种的驯化方法。

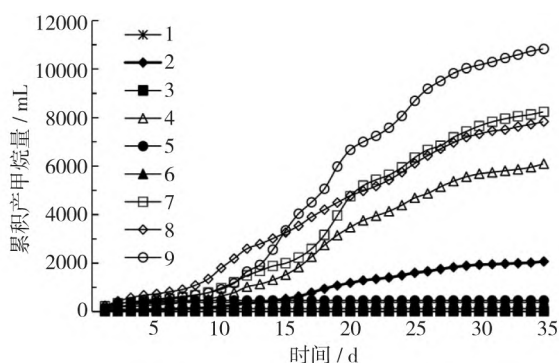


图3 累积产甲烷量

图4为厨余垃圾、秸秆、沼渣协同高温厌氧消化产甲烷总量。可以直观看出,试验序号为4、7、8、9的反应器累积产甲烷量较高,最高累积产甲烷量可达 10000 mL 左右。根据累积产甲烷量,选出4组物料有机负荷配比较好的试验序列,分别为沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 2:1:2、沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:1:3、沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:2:1、沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:3:2。

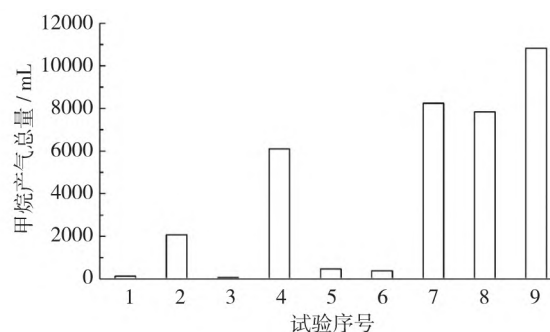


图4 厨余垃圾、秸秆、沼渣协同高温厌氧消化产甲烷总量

2.3 不同物料因素正交试验方案结果的极差分析

正交实验方法也称正交试验设计法,是研究多因素多水平的一种设计方法,其利用数理统计学的正交性原理,挑选出具有代表性和典型性的试验,大量减少试验的次数,适用于分析3个以上及多因素试验的优化^[21]。

为了评价各种物料对高温厌氧消化甲烷产气性能的影响程度,对正交试验结果进行了极差分析,试验指标结果及分析如表5。其中 K_i 表示任一列上水平号为 i (本研究中 $i = 1, 2, 3$) 时所对应的试验结果之和; $m_i = K_i / 3$ 。在任何一列上,极差值为 $\max(m_1, m_2, m_3) - \min(m_1, m_2, m_3)$ 。一般来说,极差大的因素,通常是主要因素,极差小的因素是次要因素。由结果可知,各物料对高温厌氧消化甲烷产气量影响的主次因素为:沼渣 > 厨余垃圾 > 秸秆,说明沼渣进样量对甲烷产气量影响显著。同时可以看出最优物料有机负荷配比为沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:1:2。

2.4 不同物料因素正交试验方案结果的方差分析

为弥补极差分析不能准确估计各因素误差大小以及不能量化各因素对试验结果影响程度的不足,进一步采用方差分析方法,并通过 F 检验法对影响因素进行显著性检验^[22],方差分析结果见表6,以单个因素的影响计算。F 检验结果表明,沼渣和厨余垃圾进样量对高温厌氧消化甲烷产量影响显著,

秸秆进样量影响不显著,且在设定的进样有机负荷条件下,影响甲烷产气量的主次因素依次为:沼渣 > 厨余垃圾 > 秸秆,这与极差分析结果具有较好的一致性。对显著因子应取最好的水平,对不显著因子的水平可以任意选取,因此沼渣和厨余垃圾有机负荷配比宜选取沼渣:厨余垃圾 = 3:2,秸秆可根据系统稳定性选择配比,本试验中所选最佳实验物料有机负荷配比为沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:3:2。

表5 正交试验极差分析结果

试验编号	沼渣	秸秆	厨余垃圾	单位 TS 累积产甲烷量 (mL·g ⁻¹ TS)
1	1	1	1	2.60
2	1	2	2	25.65
3	1	3	3	0.10
4	2	1	2	75.57
5	2	2	3	4.10
6	2	3	1	3.98
7	3	1	3	73.37
8	3	2	1	81.09
9	3	3	2	84.53
K_1	28.35	151.54	87.67	
K_2	83.65	110.84	185.76	
K_3	238.99	88.61	77.57	
m_1	9.45	50.51	29.22	
m_2	27.88	36.95	61.92	
m_3	79.66	29.54	25.86	
极差 R	70.21	20.97	36.06	

表6 影响因素方差分析

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	临界值	显著性
沼渣	7951	2	3975	10.16	$F_{0.10}(2,2) = 9.00$	**
秸秆	678	2	339	0.87	$F_{0.25}(2,2) = 3.00$	—
厨余垃圾	2412	2	1206	3.08		*
误差	782	2	391			
总和	11824	8				

注: **表示 F 值 > $F_{0.10}(2,2) = 9.00$, 通过 0.10 的显著性检验; * 表示 F 值 > $F_{0.25}(2,2) = 3.00$, 通过 0.25 的显著性检验; “—”表示不显著。

3 结论与建议

本试验以生活垃圾分类中厨余垃圾、秸秆和沼渣为原料,通过正交试验调节 3 种物料有机负荷配比,在 $55^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 下进行高温厌氧消化反应,分析了

不同物料有机负荷配比日产甲烷量和累积甲烷产气量,得出以下主要结论:

(1) 根据不同物料有机负荷配比产甲烷量可以看出,高温厌氧消化处理时间明显比中温厌氧消化时间缩短,提高了生活垃圾分类后厨余垃圾的厌氧消化处理能力,有效地促进了生活垃圾分类终端处理效率。

(2) 根据不同物料有机负荷配比产甲烷总量,可直观筛选出 4 组物料有机负荷配比较好的试验序列,分别为沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 2:1:2、沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:1:3、沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:2:1、沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:3:2。所选产气量较好的配比均是有机负荷较高的组合,且甲烷的产生量也随有机负荷的增大而增大。

(3) 根据不同物料有机负荷配比累积产甲烷量的极差分析,得出 3 种物料对高温厌氧消化甲烷产气量的影响程度为:沼渣 > 厨余垃圾 > 秸秆,筛选出的最佳物料有机负荷配比为沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:1:2; 根据不同物料有机负荷配比累积产甲烷量的方差分析,发现在设定的进样有机负荷下,沼渣和厨余垃圾进样量对高温厌氧消化甲烷产量影响显著,秸秆进样量影响不显著,因此在实际实验过程宜取的最佳有机负荷配比为沼渣:厨余垃圾 = 3:2,秸秆可根据系统稳定性选择配比,本试验所选最佳物料有机负荷配比为沼渣:秸秆:厨余垃圾 = 3:3:2。

(4) 本文初步选出厨余垃圾、秸秆和沼渣协同进行高温厌氧消化产甲烷时的最佳物料有机负荷配比,为厨余垃圾处理工艺提供了新的可选方案。但由于甲烷厌氧消化的影响因素有很多,如温度、停留时间、有机负荷率、搅拌及混合程度、pH 值、C/N 比、重金属等,在实际工艺启动运行之前,还应进行中试试验,选取稳定的工艺条件。

(5) 本文选取的物料厨余垃圾是经过严格垃圾分类后的家庭厨余垃圾和农贸市场蔬菜废弃物的混合物,与实际生活中的厨余垃圾成分含量有一定误差,工程实践中还应细化厨余垃圾源头成分分类,提高厌氧消化处理效率。

参考文献:

- [1] 丁燕沁,李军,常国华,等. “无废城市”建设下的城市生活垃圾分类现状探析——以兰州市为例[J]. 环境与发展, 2021, 33(01): 204-208+225.
- [2] 生活垃圾分类标志: GB/T 19095—2019[S].

- [3] E20 研究院. 有机固废处理行业分析报告 [R]. 北京: E20 研究院 2019.
- [4] 刘建国,程云. 厨余垃圾分类处理应适度适量 [J]. 城乡建设 2019(20): 24-26.
- [5] 郑苇,陈子璇,马换梅,等. 厨余垃圾就地处理技术现状分析及建议 [J]. 四川环境, 2021, 40(05): 235-240.
- [6] 李欢,周颖君,刘建国,等. 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2398-2408.
- [7] 时睿佳,宋啸博,王御霏,等. 国内外厨余垃圾现状及资源化处理方法 [J]. 现代盐化工, 2020, 47(04): 68-69.
- [8] 王玉峰. 垃圾分类后厨余垃圾处理问题及改进措施 [J]. 智能城市 2021 7(04): 109-110.
- [9] Minale M, Worku T. Anaerobic co-digestion of sanitary wastewater and kitchen solid waste for biogas and fertilizer production under ambient temperature: waste generated from condominium house [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11: 509-516.
- [10] Lin J, Zuo J E, Gan L L et al. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China [J]. Journal of Environmental Sciences 2011 23 (8): 1403-1408.
- [11] 蒋滔,李平,任桂英,等. 餐厨垃圾与玉米秸秆混合中温发酵产气效果模拟 [J]. 生态与农村环境学报, 2015 31(01): 124-130.
- [12] 刘月玲,乔玮, Serena CROCE, 等. 餐厨垃圾和秸秆混合连续高温甲烷发酵研究 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(06): 2194-2202.
- [13] Wang X M, Li Z F, Bai X, et al. Study on improving anaerobic co-digestion of cow manure and corn straw by fruit and vegetable waste: Methane production and microbial community in CSTR process [J]. Bioresour Technol, 2018, 249: 290-297.
- [14] 马换梅,高波,郑苇,等. 餐厨垃圾厌氧消化残余物土壤利用现状调研分析 [J]. 中国沼气, 2021, 39(03): 27-34.
- [15] [日]野池达也. 甲烷发酵 [M]. 北京: 化学工业出版社 2014.
- [16] 郭香麟,左剑恶,史绪川,等. 餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 [J]. 环境科学 2017 38(07): 3070-3077.
- [17] Wang C X. Organic waste anaerobic digestion and its technology of comprehensive utilization [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2006, 24(7): 25-28.
- [18] 张文哲,陈静,刘玉,等. 中温和高温厌氧消化的比较 [J]. 化工进展 2018 37(12): 4853-4861.
- [19] 张腾. 厌氧消化技术在有机固体废弃物处理中的应用 [J]. 四川化工 2019 22(05): 37-40+54.
- [20] 周祺,刘研萍,邹德勋,等. 餐厨垃圾与玉米秸秆联合厌氧消化产甲烷性能的试验研究 [J]. 中国沼气, 2014 32(01): 27-31+48.
- [21] 陈娟,曾杨,王治业,等. 餐厨垃圾发酵高温产甲烷菌种的驯化方法研究 [J]. 甘肃科学学报 2014 26(03): 46-49.
- [22] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社 2017.
- [23] 李光耀. 基于数值模式的臭氧及其前体物的非线性响应特征及控制方案 [D]. 兰州: 兰州大学 2021.