

餐厨垃圾厌氧消化残余物的利用现状及展望

李晨曦¹, 王铭娅¹, 吴春东^{1*}, 兰珊¹, 秦德煜¹, 杜萌洁², 赵宇彭¹

(1. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163000; 2. 东北石油大学, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 我国每天都有大量的餐厨垃圾生成, 厌氧消化技术是目前解决餐厨垃圾问题的主要方式, 通过厌氧微生物的代谢作用, 有机物被分解为甲烷, 同时产生了消化残余物(沼渣和沼液), 但其中仍保存着大量营养元素。对餐厨垃圾厌氧消化的利用现状、餐厨垃圾厌氧消化残余物的特性进行了调研, 分析了餐厨垃圾厌氧消化残余物的利用现状, 为餐厨垃圾厌氧消化残余物的资源化利用提供合理的研究思路。

关键词: 餐厨垃圾; 厌氧消化; 沼渣; 沼液

中图分类号: S216.4; X703; X705 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)02-0003-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023020003

Utilization Status and Prospect of Anaerobic Digestion Residue of Food Waste / LI Chenxi¹, WANG Mingya¹, WU Chundong^{1*}, LAN Shan¹, QIN Deyu¹, DU Mengjie², ZHAO Yupeng¹ / (1. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China; 2. Northeast Petroleum University, Daqing 163000, China)

Abstract: A large amount of food waste is generated every day in China. Anaerobic digestion technology is the main way to solve the problem of food waste at present. Through the metabolism of anaerobic microorganisms, organic matter is decomposed into methane, and digestive residues (biogas residue and biogas slurry) are produced at the same time, but a large number of nutrient elements are still preserved in it. In this paper, the utilization status of anaerobic digestion of food waste and the characteristics of anaerobic digestion residues of food waste are investigated, and the utilization status of anaerobic digestion residues of food waste is analyzed, so as to provide a reasonable research way for the resource utilization of anaerobic digestion residues of food waste.

Key words: kitchen waste; anaerobic digestion; biogas residue; biogas slurry

随着国内消费水平提高,餐厨垃圾的产量也逐渐递增。根据灵动核心数据显示,2020年中国餐厨垃圾年产生量达到约1.16亿吨,2021年预计突破1.3亿吨,2022~2026年我国餐厨垃圾年复合增长率将保持12%~15%的增量持续增长^[1]。餐厨垃圾成分复杂,营养物质丰富,若不及时处理容易腐烂变质,并发出强烈恶臭,传播细菌和病毒,对环境造成很大的影响。

目前,国内外餐厨垃圾处理技术主要有好氧堆肥、厌氧消化、炭化处理、微生物处理、焚烧和填埋^[2]。厌氧消化是处理餐厨垃圾的主流技术,对其他城市固体有机废物也得到高效利用^[3]。餐厨垃圾成分复杂,有机物含量高,是一种理想的厌氧消化基质,并且产生的甲烷是友好的生物燃料^[4-5],有助于推动实现“双碳”目标。同时,由于消化残余物特

性复杂,若处理不当会对环境造成双重污染,国内餐厨垃圾厌氧消化后的沼渣和沼液利用途径不同,沼渣进入焚烧和填埋处理,沼液则进入污水处理系统^[6]。因此,餐厨垃圾厌氧消化残余物的处理问题也很重要,在满足餐厨垃圾资源化处理的同时,对其消化残余物的处置也是一项必要举措。

通过调查分析我国餐厨垃圾厌氧消化后沼渣沼液的理化特性,笔者认为厌氧消化技术是目前处理餐厨垃圾的主流技术,结合当今社会的主要发展趋势,探索更合理的餐厨垃圾消化残余物的资源化利用途径,从而提高餐厨垃圾处理的经济效益,为餐厨垃圾厌氧消化残余物的利用提供支持。

1 厌氧消化技术处理餐厨垃圾的应用现状

目前,厌氧消化被广泛认为是处理餐厨垃圾以

收稿日期: 2022-04-19 修回日期: 2022-11-28

项目来源: 黑龙江八一农垦大学自然科学人才培养计划(ZRCYP202206)

作者简介: 李晨曦(1982-)女,教授,主要从事生物质综合利用研究等工作, E-mail: chenxi_170@hotmail.com

通信作者: 吴春东, E-mail: 1431269471@qq.com

产生沼气的合适技术^[7]。据统计,国内大多数餐厨垃圾处理工程均采用厌氧消化工艺,表1^[8]列举了

国内部分餐厨垃圾试点城市处理设施情况。其中大约50%的餐厨垃圾处理工艺采用厌氧消化技术。

表1 各地区餐厨垃圾处理工艺

地区	名称	处理工艺	规模/t
石家庄	餐厨垃圾处理中心	预处理+厌氧+堆肥	500
太原	餐厨垃圾综合处理厂	厌氧消化	500
沈阳	老虎冲餐厨垃圾处理厂	厌氧消化	200
哈尔滨	餐厨垃圾环保处理厂	厌氧消化	300
南京	雨花台区板桥街道	微生物处理制肥	100
北京	董村垃圾综合处理厂	厌氧消化	200
上海	崇明县餐厨垃圾处理厂	肥料化	200
兰州	餐厨垃圾处理厂	生物技术综合处理工艺	200
南昌	餐厨垃圾处理厂	生物柴油+高温厌氧消化	200
潍坊	餐厨垃圾处理厂	生物柴油+沼气	200
青岛	餐厨垃圾处理厂	高温厌氧消化处理工艺	200
深圳	生物质垃圾处理厂	厌氧消化	100
呼和浩特	餐厨垃圾处理厂	饲料化	150
天津	餐厨垃圾处理厂	饲料化	300
苏州	餐厨垃圾处理厂	生物柴油+饲料化	100
北京	高安屯餐厨垃圾处理厂	好氧堆肥	200
武汉	汉口西部餐厨垃圾处置厂	厌氧消化	200
贵阳	餐厨垃圾处理厂二期	饲料化	400
昆明	官渡区白水塘静脉产业园内	厌氧消化	200
成都	餐厨垃圾处理厂二期	饲料化	300

尽管厌氧消化技术在国内得到广泛应用,餐厨垃圾污染环境的问题得到有效改善,但是餐厨垃圾厌氧消化处理过程中也会产生污染物,且面临着沼渣沼液难处理的问题^[9]。

厌氧消化处理餐厨垃圾不仅能获得沼气,还有各种有机酸、醇类和氢气的产生,这实现了餐厨垃圾的资源化利用和减量化处理^[10]。由于沼气中含有硫化氢、氨气、二氧化硫等气体,会和挥发到大气中的挥发性脂肪酸混合成为臭气的一部分。因此,若沼渣沼液随意排放,不仅会造成营养元素的流失,还会二次污染环境。

2 餐厨垃圾厌氧消化残余物的特性

2.1 营养特性

餐厨垃圾厌氧消化残余物经过分离后形成沼渣和沼液,仍保留了大量的营养物质,包括有机质和腐殖质酸类物质^[11]。餐厨垃圾厌氧消化残余物中有

机质含量为33%~73.3%^[12]。经过脱水后沼渣中有机质含量在61.7%~73.6%^[13]。李祎雯^[14]等研究表明沼液中水溶性氮、磷、钾含量分别为0.124 wt%、0.0063 wt%、0.026 wt%。

沼渣沼液含有丰富的氮、磷、钾等植物生长所需的营养元素。对于消化底物不同可能会导致消化残余物中各组分及含量有所差异,由秸秆厌氧消化产生的残余物中氮、磷、钾含量分别为41.3 g·kg⁻¹、31.02 g·kg⁻¹、12.75 g·kg⁻¹;由畜禽粪便厌氧消化产生的残余物中氮、磷、钾含量分别为17.41 g·kg⁻¹、31.02 g·kg⁻¹、12.75 g·kg⁻¹^[15]。邵明帅^[16]等对餐厨垃圾厌氧消化后的沼渣沼液的组分与基本特征进行分析,其中C、H、O、N的含量分别为38.79%、5.28%、20.83%、7.28%,高含碳量说明有机质在厌氧消化过程中并未完全降解,餐厨垃圾沼渣沼液中还有一定的资源利用价值。康杨天睿^[17]对某食堂餐厨垃圾在实验室厌氧消化后的沼渣进行

成分分析,并与工业装置发酵的沼渣成分对比,如表2所示,原材料来源不同会对其成分造成一定的偏差。此外,沼渣中还含有钠、镁、钙等常量元素以及铁、锌、铜等微量元素,施用于土壤可改善土壤结构,

促进作物生长^[18]。另外,由于厌氧消化残余物是在微生物存在的情况下产生的,因此沼渣沼液中可能含有被沙门氏菌、大肠杆菌、肠杆菌科和肠道寄生虫等病菌^[19]。因此,沼渣沼液也存在病原体污染的风险。

表2 餐厨垃圾沼渣主要成分

检测项目	含水率 %	有机质 %	碳氮比	总氮 %	总磷 %	总钾 %	pH 值
实验室沼渣	75.1	48.5	14.7:1	2.12	1.01	4.64	6.80~7.05
工业沼渣	80.6	44.6	11.8:1	3.02	1.22	4.33	—

餐厨垃圾与畜禽粪便经厌氧消化后沼液性质大体相似,但由于餐厨垃圾的“四高”特性导致重铬酸钾、氨氮和含盐量更高^[20],因此其污染程度与处理难度更大。由于沼渣沼液产生量大,且成分复杂,营养元素丰富的同时重金属含量也较多,若不妥善利用会造成二次污染。

2.2 理化特性

2.2.1 pH 值

在餐厨垃圾厌氧消化反应体系中,pH 值总是呈现先降后升的趋势,这是由于消化前期挥发性脂肪酸的积累,使消化液酸化,而后期又被产甲烷菌消化利用。同时,各类微生物代谢产生的氨氮也会影响厌氧消化体系的 pH 值^[21]。对于沼渣的 pH 值大多在 6.54~8.41 范围内,而餐厨垃圾厌氧消化后的沼液 pH 值在 6~9 范围内^[22-23],其酸碱度呈现偏中性。

2.2.2 含盐量

餐厨垃圾的理化特性可以用“四高”来描述,其中高含盐量主要来源于一日三餐中所加入的食用盐与调料。这使得餐厨垃圾厌氧消化后的残余物中含盐量与初始底物基本一致。通常餐厨垃圾含盐量为 1.26~2.62 wt%^[9]。黄俊翰^[24]等通过研究表明,沼气产量受含盐量的影响,含盐量过多会起抑制作用。

2.2.3 重金属含量

污水灌溉会造成植物作物中重金属富集,以及在现代作物中大量激素、促生长药物和添加剂的使用,使动物粪便中含有大量的重金属和有害物质,以秸秆、粪便、果蔬、餐厨垃圾等物质为原料厌氧消化,其产生的沼渣沼液可能含有大量的重金属^[25]。王巧玲^[26]对餐厨垃圾厌氧发酵的影响因素研究表明,餐厨垃圾重金属成分有 Cu、Zn、Hg,不含其他重金属,因此其发酵残渣中也会存留一部分重金属,若直

接排放会造成环境污染。

3 餐厨垃圾厌氧消化残余物的利用现状

3.1 沼渣的利用现状

根据餐厨垃圾厌氧消化残余物的特性分析,沼渣的特点使其具有资源化利用的可行性,目前沼渣可用于焚烧产热、农业土地利用、培养基,以及在养殖业上推广应用。沼渣的资源化利用已成为餐厨垃圾厌氧消化的重要发展产业之一,沼渣利用方式优缺点的对比见表3。

Simone^[27]等研究了沼渣作为燃料的可行性,研究结果表明沼渣并不适合于燃烧应用,但是在经过 150℃ 高温干燥后,其热值达到了 16.6 MJ·kg⁻¹,可用作燃料。由此可知,厌氧消化沼渣中含有的有机质提供了其作为燃料的可行性,但沼渣含水率高,这增加了沼渣燃烧的成本。

沼渣中的残余有机质,与植物生长所需的氮、磷、钾等营养物质与腐殖酸,是一种良好的土壤改良剂,具有发展为有机肥料形成绿化土的潜力。有研究表明^[28],餐厨垃圾厌氧消化沼渣制有机肥具有可行性与安全性。Furukawa^[29]等发现沼渣具有良好的土壤利用价值,其中氮含量主要影响土壤质量。王爱英^[30]等研究了沼渣作为土壤改良剂对土壤酸化的改良效果,结果表明沼渣施入使土壤 pH 值上升,孔隙度和蓄水保墒能力均增加,有效调节酸性土壤。沼渣不宜直接施用于土壤,其具有刺激性气味的特性极易造成环境二次污染。目前,好氧堆肥是沼渣资源化利用程度较高的处理技术,餐厨垃圾厌氧消化沼渣可通过好氧堆肥转化为有机肥基质或园林用土^[31]。但沼渣制肥的品质不佳并且可能存在重金属超标的问题,这使得餐厨垃圾厌氧消化沼渣所堆肥料相比于其他类型有机废弃物所堆肥料的销售难度更大。Wang^[32]等认为将沼渣进行好氧堆肥

后可获得肥力更高的有机肥,而不宜直接作为肥料使用。由于餐厨垃圾本身具有高油高盐的特性,其沼渣中仍含有一定的含油量与含盐量,如将其农用需要进行处理与进一步确定。

随着沼气工程的发展,沼渣在养殖业上的应用也得到发展,主要将沼渣作为饲料或者饲料添加剂。沼渣还可制成高蛋白饲料、生物炭等高附加值产品^[33]。张记市^[34]等发明了一种利用蜚蠊消纳餐厨垃圾沼渣生产饲料的方法,餐厨垃圾厌氧消化后的沼渣可借助蜚蠊的消化和繁殖能力转化为饲料,此方法虽然解决了同源性污染的问题,但是处理规模有限的问题依旧难以解决。已有研究人员开展餐厨垃圾沼渣热解产生物质碳的实验研究,Liu^[35]等将沼渣烘干后采用热解气化技术产生物质碳;郑杨青^[36]将餐厨垃圾沼渣与表面活性剂和粉煤灰联合调理后进行热解产生物质碳实验,结果表明,沼渣制取生物质碳的过程对环境友好。但饲料化利用存在着处理速度慢的缺陷,且有造成同源性疾病传播的风险^[37]。沼渣中含有大量的病原微生物和寄生虫卵,若不能有效地杀灭病原微生物和寄生虫卵,不仅会引发传染病,还会危及人们身体健康,因此将沼渣应用于养殖业之前应慎重对沼渣进行无害化处理。

表3 沼渣利用方式优缺点对比

利用方式	优点	缺点
燃烧	热能回收利用	成本高
直接土地利用	操作简单	二次污染环境的风险
土壤改良剂、肥料	经济价值高、无环境污染	技术难度大
饲料化	技术简单、成本低	存在传染病风险

3.2 沼液的利用现状

餐厨垃圾厌氧消化后的沼液总磷、总氮含量较高,会造成水体富营养化, Na^+ 含量较高会造成土地盐碱化,处理后可作为肥料在农业上应用。沼液的处置去向有焚烧填埋、污水处理厂、用作肥料(沼液还田、叶面喷肥)、沼液浸种、防治病虫害等,在养殖业上用作畜禽饲料,在实现环保的同时,充分利用其价值。沼液利用方式优缺点的对比见表4。目前主要以沼液还田为主^[38-39]。孙芳芳^[40]等研究发现沼液灌溉存在氮淋溶风险,考虑氮淋溶风险、油菜农艺性状和沼液消纳需求,沼液还田施氮量控制在 $240 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内为宜。陆新苗^[41]等研究了不同沼液还田量对西瓜产量及土壤环境的影响,发现利用沼液还田可提高作物产量。孙天姿^[42]等研究表明,施

用餐厨垃圾厌氧消化沼液制备液态菌肥对农田土壤理化性质的养分起促进作用,能够提高农作物土壤有机组分,改善土壤肥力。郝民杰^[43]等研究了沼液在蚯蚓养殖上的利用,发现在养殖床上添加沼液可以使蚯蚓的体重较空白增加12%,并且蚯蚓的形态明显变粗。

但是沼液不能直接施用,尤其对于幼苗,会使作物出现烧苗现象。彭立宇^[44]以O/ABR工艺降解厌氧消化沼液,以实现沼液的无害化处理。沼液中的营养物质含量决定了餐厨垃圾厌氧消化的经济效益^[45]。

表4 沼液利用方式优缺点对比

利用方式	优点	缺点
沼液还田、用作肥料	改善土壤质量,提高作物产量	技术要求与工艺成本较高
沼液浸种	提高发芽率	存在烧苗风险
防治病虫害	驱虫、杀虫、杀菌	处理难度大
畜禽饲料	产品转化率高、减少病发	经济价值较低

在工程应用中,由于餐厨垃圾消化残余物成分复杂且稳定性不高,因此消化残余物多数情况下要经过有效处理后再利用。

4 结论与展望

我国餐厨垃圾产量大,具有较强的可利用性。以厌氧消化技术进行处理时,产生沼气的同时也伴随有大量沼渣和沼液的产生。对沼渣沼液的特性分析,确定其同样具有一定的可利用性。沼渣沼液中营养元素丰富,使其满足二次利用的特性,可用于肥料、土壤改良剂、农田灌溉以及防治病虫害等。在施用的同时,也要满足沼渣沼液稳定达标方可使用,否则会造成二次污染。对沼渣沼液的利用给出几点展望:1)避免重金属超标对施用土壤、地下水和作物产生污染;2)沼渣沼液作为土壤改良剂是不错的发展前景,但是作为肥料需要对其肥力进行评估,避免给作物造成不利影响;3)防止因餐厨垃圾高含盐量的特性形成盐碱地。加强餐厨垃圾资源化、减量化、无害化利用研究,尤其是厌氧消化技术,并且开发其残余物利用研究,具有较大的经济、环境和社会效益。

参考文献:

- [1] 腾讯网. 我国餐厨垃圾来源及产生量分析 [EL/OL]. (2022-2-1) [2022-5-27]. 我国餐厨垃圾来源及

- 产生量分析_腾讯新闻 <https://new.qq.com/omn/20220201/20220201A0625L00.html>.
- [2] 常燕青,朱丽可,张乐乐,等. 典型餐厨垃圾处理实用技术探讨[J]. 山西建筑, 2021, 47(12): 1-3.
- [3] Liu Nuo, Jiang Jianguo. Effects of activated carbon on the in-situ control of odorous gases emitted from anaerobic digestion of food waste and the microbial community response [J]. *Environmental Technology Innovation*, 2021, 21: 5-9.
- [4] Jing Zhang, Rongtang Zhang, Qiulai He, et al. Adaptation to salinity: Response of biogas production and microbial communities in anaerobic digestion of kitchen waste to salinity stress [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2020, 130(2): 3-5.
- [5] 刘安琪,夏港,关昊为,等. 餐厨垃圾厌氧消化的研究进展和趋势[J]. 绿色科技, 2020(22): 94-96.
- [6] 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.
- [7] Ying Meng, Sang Li, Hairong Yuan, et al. Effect of lipase addition on hydrolysis and biomethane production of Chinese food waste [J]. *Bioresource Technology*, 2015: 179.
- [8] 邴君妍,罗恩华,金宜英,等. 中国餐厨垃圾资源化利用系统建设现状研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(04): 39-43.
- [9] 吕凡,章骅,邵立明,等. 基于物质流分析餐厨垃圾厌氧消化工艺的问题与对策[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(01): 1-9.
- [10] 王丹,梁良,刘阳. 我国餐厨垃圾处理工艺技术路线选择与分析[J]. 中国标准化, 2019(20): 220-222.
- [11] 张茜. 沼肥的利用现状及前景分析[J]. 广东化工, 2018, 45(18): 161-162+149.
- [12] E M Barampouti, S Mai, D Malamis, et al. Exploring technological alternatives of nutrient recovery from digestate as a secondary resource [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110379.
- [13] Fan Lü, Qi Zhou, Duo Wu, et al. Dewaterability of anaerobic digestate from food waste: Relationship with extracellular polymeric substances [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015: 262.
- [14] 李祎雯,曲英华,徐奕琳,等. 不同发酵原料沼液的养分含量及变化[J]. 中国沼气, 2012, 30(03): 17-20, 24.
- [15] 史玉红,刘宏新. 沼气工程残余物资源化利用研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 211-215.
- [16] 邵明帅,张超,吴华南,等. 水热耦合厌氧消化技术处理餐厨垃圾沼渣沼液及工艺能耗分析[J]. 化工进展, 2022, 41(05): 2733-2742.
- [17] 康杨天睿. 餐厨垃圾厌氧消化沼渣与绿化垃圾混合堆肥试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [18] 宗旺. 渗滤床反应器处理餐厨垃圾条件优化及沼渣肥效评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [19] Wojciech Czekala, Andrzej Lewicki, Patrycja Pochwatka, et al. Digestate management in Polish farms as an element of the nutrient cycle [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242(C): 118454.
- [20] 王冰洁. 餐厨垃圾厌氧消化及沼液处理工艺优化试验研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019.
- [21] 王爱英,赵啸林,孙玲丽,等. 沼渣土壤调理剂对胶东地区酸性土壤改良效果研究[J]. 中国沼气, 2019, 37(04): 98-102.
- [22] 邬振江,颜成,杨德坤,等. 大型餐厨垃圾处理厂沼液处理工艺的运行效果分析[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(03): 485-491.
- [23] 李保光,张爱军,戴小东,等. 两级AO-MBR组合工艺处理餐厨垃圾厌氧沼液的工程应用[J]. 节能与环保, 2020(04): 88-90.
- [24] 黄俊翰,王红娟,黄涛,等. 温度、含盐量以及含油量对餐厨垃圾和污泥联合厌氧发酵的影响[J]. 化工管理, 2018(12): 15-17.
- [25] 燕艳. 餐厨垃圾厌氧消化污染物的排放特征与环境风险分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- [26] 王巧玲. 餐厨垃圾厌氧发酵过程的影响因素研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [27] Simone Pedrazzi, Giulio Allesina, Tobia Bell6, et al. Digestate as bio-fuel in domestic furnaces [J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 130: 172-178.
- [28] 王洋. 餐厨垃圾厌氧发酵及沼渣资源化利用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [29] Furukawa Yuichiro, Hasegawa Hiroshi. Response of Spinach and Komatsuna to Biogas Effluent Made from Source-Separated Kitchen Garbage [J]. *J EnvironQual*, 2006, 35(5): 1939-1947.
- [30] 王爱英,赵啸林,等. 沼渣土壤调理剂对胶东地区酸性土壤改良效果研究[J]. 中国沼气, 2019, 37(04): 98-102.
- [31] 张黎阳. 餐厨垃圾厌氧消化后沼渣的好氧堆肥优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [32] Ting Ting Wang, Shi Peng Wang, Xiao Zhong Zhong, et al. Converting digested residue eluted from dry anaerobic digestion of distilled grain waste into value-added fertilizer by aerobic composting [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 530-536.
- [33] 张青青,陈平,李跃忠,等. 有机废弃物沼渣资源化利

- 用现状及发展趋势[J]. 园林 2020(06):2-7.
- [34] 齐鲁工业大学. 一种利用蜚蠊消纳餐厨垃圾沼气工程沼渣生产饲料的方法: CN201910029869.1 [P]. 2019-06-20.
- [35] Liu J, Huang S, Chen K, et al. Preparation of biochar from food waste digestate: Pyrolysis behavior and product properties [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122841.
- [36] 郑杨清. 生物甲烷副产物沼渣的脱水性能及资源化利用研究[D]. 福建: 厦门大学 2015.
- [37] 徐长勇, 宋薇, 赵树青, 等. 餐厨垃圾饲料化技术的同源性污染研究[J]. 环境卫生工程 2011, 19(01): 9-10+15.
- [38] 李龙涛, 李万明, 孙继民, 等. 城乡有机废弃物资源化利用现状及展望[J]. 农业资源与环境学报 2019, 36(03): 264-271.
- [39] 王嘉鑫, 黄青, 赵小芳, 等. 沼液在水稻生产中的资源化利用及效益综述[J]. 湖南农业科学 2019(09): 114-118.
- [40] 孙芳芳, 江涛, 成剑波, 等. 沼液施用对贵州典型黄壤油菜地氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报 2022, 41(06): 1327-1336.
- [41] 陆新苗, 王卫平, 魏章焕, 等. 不同沼液灌溉量对西瓜产量及土壤环境的影响[J]. 天津农业科学 2010, 16(05): 142-144.
- [42] 孙天姿, 王攀, 陈锡腾, 等. 餐厨垃圾厌氧发酵沼液制备的液态菌肥对农田土壤理化性质的影响[J]. 环境工程 2020, 38(08): 201-206.
- [43] 郝民杰, 张砾, 芦翔. 沼液在蚯蚓养殖中的资源化应用效果研究[J]. 河南农业科学 2011, 40(01): 157-159.
- [44] 彭立宇. 综合应用厌氧消化工艺处理餐厨垃圾的研究[D]. 北京: 北京化工大学 2018.
- [45] Li Yangyang, Qi Chuanren, Zhang Yiran, et al. Anaerobic digestion of agricultural wastes from liquid to solid state: Performance and environ-economic comparison [J]. *Bioresource Technology* 2021, 332: 125080.