

浅析我国餐厨垃圾资源化利用模式和技术路径

刘晓吉¹, 肖志颖², 石川³, 王凯军^{3*}, 王志华¹, 张莹莹¹, 王勇群¹

(1. 中节能(肥西)环保能源有限公司, 安徽 合肥 231241; 2. 中国农业银行, 北京 100005; 3. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 近年来, 国家加大对餐厨垃圾处置与资源化基础设施建设的投资力度, 推动了餐厨垃圾资源化产业的“减污增效”转型。目前, 国内形成以厌氧消化、好氧堆肥为主, 生物饲料化、昆虫养殖等为辅的处理技术单元。在实际项目中, 单一的技术路径的选择导致餐厨垃圾处理和资源化利用效益低等问题。因此, 技术融合和资源化利用模式完善能够充分挖掘并获取餐厨垃圾的资源化价值。基于以上分析, 提出了基于水力浆化预处理、三相分离、液相厌氧消化和固相好氧堆肥技术融合、多种资源化技术协同路径, 和向能源行业和农业延伸的“环能之道”和“环农之道”相结合的资源化模式。该技术路径和资源化模式的提出对现有项目改造和新项目建设具有重要的指导意义, 有利于餐厨垃圾处置与资源化行业的高质量发展。

关键词: 餐厨垃圾; 资源化模式; 技术路径; 能源转化; 资源循环

中图分类号: S216.4; X703; X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2024)02-0013-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024020013

Analysis on the Resource Utilization Mode and Technical Route for the Treatment of Food Waste in China / LIU Xiaoji¹, XIAO Zhiying², SHI Chuan³, WANG Kaijun^{3*}, WANG Zhihua¹, ZHANG Yingying¹, WANG Yongqun¹ / (1. CECEP (Feixi) WTE Co Ltd, Hefei 231241, China; 2. Agricultural Bank of China, Beijing 100005, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, China has increased its investment in the construction of food waste disposal and resource utilization infrastructure to promote the “pollution reduction and efficiency increase” transformation of food waste resourcefulness industry. At present, anaerobic digestion and aerobic composting are as the main treatment technologies, supplemented by biological feederization, insect breeding, etc. In practice, enterprises generally tend to choose a single technical route, which leads to low efficiency and low benefit of resource utilization treatment. Therefore, technology integration and resource utilization model improvement are urgently needed to fully explore and obtain the resource utilization value of food waste. Based on the above analysis, this paper proposed a Bagua Resource Utilization Model based on the integration of hydraulic pulping pretreatment, three-phase separation, liquid-phase anaerobic digestion and solid-phase aerobic composting technologies, and the synergy of various resource utilization technologies to form a combination of “environmental energy road” and “environmental agriculture road”, which closely connects with energy industry and agriculture. The proposed Resource Utilization Model is an important guideline for the renovation of existing projects and the construction of new projects, which is conducive to the high-quality development of the food waste disposal and resource-based industry.

Key words: food waste; resource utilization mode; technical route; energy conversion; resource recycling

餐厨垃圾又称餐饮垃圾, 是指餐饮服务、集体供餐等活动中产生的饮食剩余物及后厨加工过程中废弃的果蔬、食物和油脂等^[1-2]。目前, 我国餐厨垃圾年产已超 0.63 亿 t^[3], “十四五”期间将达到年产

0.73 亿 t, 呈现出较快的增长趋势^[4]。餐厨垃圾具有高含水率、高有机含量、高油脂和高盐分等特点, 不合理处置易发生腐烂发臭、滋生蚊虫和病毒细菌等问题, 引发严重的环境污染或食品安全事故^[1]。

收稿日期: 2023-09-19 **修回日期:** 2023-11-25

项目来源: 国家重点研发计划资助(2020YFC1908605); 中国节能环保集团有限公司重大科技创新项目资助(cecep-zdkj-2020-001)。

作者简介: 刘晓吉(1982-), 男, 苗族, 湖南邵阳人, 博士, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化利用。

通信作者: 王凯军(1965-), 男, 教授, 主要研究方向为厌氧生物发酵研究、水污染控制的研究等。

自 2000 年起,我国逐步出台和完善餐厨垃圾管理政策,加大餐厨垃圾“三化”(无害化、资源化和减量化)基础设施建设力度^[5]。“十二五”期间,国家批准了 5 批共 100 座餐厨垃圾处理试点城市,支持金额超 20 亿,完成建设餐厨垃圾处理能力达 3 万 t·d⁻¹^[2, 6],“十三五”期间又增加约 3.44 万 t·d⁻¹^[2],基本完成了大、中城市的餐厨垃圾资源化和无害化设施建设布局。餐厨垃圾市场的快速发展对传统处理技术,如厌氧消化、好氧堆肥、生物饲料和昆虫养殖等的研发应用起到了积极的推动作用。然而,企业在技术应用或研发上普遍倾向于选择单一的技术,在技术融合和资源化利用模式等方面较为欠缺,未能充分挖掘出餐厨垃圾中赋含的能源和资源价值。

面对新时代“生态文明”、“无废城市”和“双碳目标”等国家发展战略,有必要总结分析餐厨垃圾处理行业近十年来在资源化技术与模式方面积累的经验 and 存在的问题,探索适合于我国餐厨垃圾特性的技术融合路径和资源化利用模式,以满足餐厨垃圾处置及资源化行业高质量发展的要求。

1 餐厨垃圾资源化技术现状与问题

随着垃圾分类推广实施,餐厨垃圾资源化成为业界主流,厌氧消化、好氧堆肥、饲料化和昆虫养殖占据市场主导地位。针对已投运和在建餐厨处理设施的调研数据表明,厌氧消化是目前餐厨垃圾资源化的主流技术工艺,占比约 76.1%^[2, 14];其次为好氧堆肥,占比约 14.2%^[15];饲料化占比约 6.4%^[16];以及少数近年兴起的昆虫养殖资源化项目^[9]。

1.1 厌氧消化技术

厌氧消化是指在无氧环境下,利用兼性菌、厌氧菌等微生物分解餐厨有机质产生沼气(CO₄和CO₂为主)的生物转化过程^[10]。沼气提纯后可作为生物燃气燃烧或发电,实现资源和能源的价值转化。国内外一些学者利用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)的方法对餐厨垃圾处理技术的综合效益进行了评价研究,如 Franchetti^[11]和 Khoo^[12]等采用 LCA 充分证实了厌氧消化相比于填埋、焚烧和堆肥在成本效益和温室气体减排方面的优势;Wen^[13]等以苏州某餐厨项目为例,从沼气和油脂等产品回收、污染物排放、减量化和经济效益等方面综合分析,论证了苏州模式经济和环境效益显著,对国内外餐厨处置项目建设具有借鉴意义。餐厨垃圾厌氧消化工

艺通过耦合沼气提纯和油脂加工等副产品单元,工艺链条的环境和经济效益得到提升,已成为我国餐厨垃圾处置与资源化的主流路径。

我国餐厨垃圾厌氧消化工艺可根据物料消化阶段控制方式划分为单相厌氧消化与两相厌氧消化工艺,以进料含固率高低划分为湿式(<15%)与干式(≥15%)厌氧消化工艺。在实际处理过程中,餐厨厌氧消化过程因其较高的 C/N 比,反应体系较难避免酸化、氨氮抑制等技术问题,严重影响厌氧消化性能和系统稳定性。以上问题可从反应器运行、体系改良和微生物活化等方面解决。济南某餐厨处理项目设计运行了双环嵌套式厌氧消化反应器,成功实现产酸菌和产甲烷菌的两相分离,有效解决了酸化和氨氮抑制问题,处理有机负荷(以 TS 计)达 3.2 kg·m⁻³·d⁻¹,平均产气率 95 m³·t⁻¹(以入厂餐厨垃圾计)^[10]。餐厨垃圾与鸡粪^[14]、污泥^[15]、麦秆^[16]等不同物料共消化的研究结果表明,不同比例的底物混合后,餐厨厌氧处理系统的 C/N 得到有效调节,可实现 VFA 和氨氮积累的缓解和系统缓冲能力的提高。另外,通过添加生物炭可以促进种间电子传递效率,产甲烷古菌对 VFA 消耗速率得以加快,减缓 VFA 抑制^[17];添加适量的微量元素,在一定的有机负荷条件下,亦可提高微生物的活性,减缓氨氮抑制^[18]。郑祥^[4]等对上述解决酸化和氨氮抑制的方法进行了综合评述,并提出需要对相关操作带来的复杂性、高成本或其他新问题进行深入研究。

1.2 好氧堆肥技术现状与问题

好氧堆肥是指在好氧条件下,利用微生物氧化分解与合成作用,将餐厨垃圾中的有机质转化为稳定的腐殖质的生物转化过程^[6]。餐厨垃圾堆肥产品有机质含量高,氮磷钾等营养元素丰富,是优质的有机肥。经实际施用,餐厨垃圾堆肥产品不仅可以促进植物生长,对于改良土壤理化环境和提高土壤水土保持能力也具有很好的作用^[18]。

传统的好氧堆肥方式占地面积大,运行参数控制方式较为粗犷,如高效菌种缺乏、发酵温度波动起伏,造成发酵时间长、产品腐殖化程度低等问题较为突出,严重影响其市场化推广与应用。国外通过研究接种外源微生物菌剂,可使发酵快速进入高温期,达到加快腐殖化和缩短发酵周期的目的^[19]。上世纪 40 年代,美国研发了接种微生物以缩短发酵时间;70 年代,日本通过添加研发的 EM 菌剂较好地提高了堆肥效率,腐熟时间缩短至 10~15 天^[20]。

近些年,国内研究者结合我国餐厨垃圾特性在微生物菌剂研发上取得了一定的突破。魏自民^[21]等利用菌种之间相互协同作用研发了复合微生物菌剂,将有机固废堆肥腐熟时间缩短至2周左右。胡亚东^[22]等利用筛选的复合菌剂,对餐厨垃圾堆肥指标进行了评价分析,发酵10天后即可完全腐熟,种子发芽率指数(GI)超过80%。付锦涛^[23]等通过添加嗜热菌研究了餐厨垃圾超高温堆肥发酵效果,菌剂处理组GI在发酵第9天达到腐熟标准。阎中^[24]等基于EM菌种和强化推流(PFR)工艺研发,实现了反应器内功能微生物的种群物理分区,提高了餐厨垃圾的发酵效率,连续进出料时间为一周,进一步提高了发酵效率。

上述研究成果和工程应用为我国餐厨垃圾处置与肥料化奠定了基础。然而,高效堆肥设备过高的投资成本和我国餐厨垃圾高盐特性易引发土壤盐碱化问题,是当下制约我国餐厨垃圾堆肥产品市场化推广的关键因素。

1.3 生物饲料技术现状与问题

餐厨垃圾具有“食物属性”,粗蛋白、粗脂肪、氨基酸和脂肪酸等含量丰富,营养价值高,饲料化优势明显。常规的物理饲料化方法,如高温灭菌法技术因同源性安全隐患不符合国家应用标准^[6]。生物饲料化技术是利用微生物的生长繁殖和新陈代谢将餐厨垃圾转化成蛋白饲料,可有效消除同源性安全隐患。

生物饲料化技术种类多,根据生物种类的不同可分为藻类培养技术、酶处理技术和发酵技术等。研究表明,小球藻在添加餐厨垃圾水解物的环境中可快速生长,4~6天后其碳水化合物达 $400\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、蛋白质和脂质均达 $200\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[25]。酶技术处理后,餐厨垃圾的粗蛋白质、粗脂肪和氨基酸含量分别可达20.8%、35.5%和9.1%,所产生的液态饲料的粒径基本小于 $<74\text{ }\mu\text{m}$ (约占90%)^[26]。Chen^[27]等和杨丹丹^[28]等均通过接种乳酸菌等菌种和添加麦麸等生物质研究分析了餐厨垃圾发酵饲料化特征,结果表明产物蛋白质含量明显增高,达到我国饲料卫生标准。

生物饲料化技术属绿色、可持续发展技术,可有效消除食物同源和环境安全性隐患,实现餐厨垃圾的高效资源化。然而,在藻类培养、微生物驯化、酶制备等方面,对技术条件要求严格,相关设备成本较高。另外,目前利用餐厨垃圾开展生物饲料化研究

大多局限于实验室规模。因此,生物饲料化技术的产业化推广仍需技术在技术、规模和应用等方面进一步研究。

1.4 昆虫养殖技术现状与问题

昆虫养殖技术是指人工养殖蝇蛆、黑水虻和蚯蚓等,通过这些特定生物与环境微生物的协同代谢作用将餐厨垃圾转化为虫蛋白或肥料^[6]。梁剑茹^[29]等在蝇蛆养殖中开展餐厨垃圾三相分离的浆渣利用研究,浆渣减量化(76.4%)效果明显,优质有机肥产品(产率23.6%)和鲜幼虫(产率17.4%)产出得到明显提高。赖发英^[30]等利用蚯蚓消化系统富含分解转化功能酶的优势,开展有机生活垃圾养殖蚯蚓的研究,垃圾生物降解率达75.7%,基质中有机碳、氮磷含量明显升高。孙立雯^[31]对我国多个黑水虻养殖项目进行了调研,明确了“原料预处理+黑水虻多层立体养殖+虫砂分离+鲜虫冷冻/烘干外售”的主要养殖工艺的可行性;以武汉项目为例,鲜虫产率16.7%(即60t餐厨日产10t鲜虫),烘干后可得3t干虫,虫蛋白含量约40%。

通过养殖昆虫的生物转化,可有效阻断同源性蛋白在食物链中的传播,降低饲料化同源污染的风险。目前,昆虫养殖进行餐厨垃圾生物转化技术仍存在需解决的实际问题,如生产设备的自动化程度低,温度控制达不到要求容易造成产品质量波动不稳定;环境控制成本高、为节省成本而导致养殖现场环境脏乱差等问题;另外,产品销路仍不畅通,难以实现规模化生产。

2 餐厨垃圾资源化模式探讨

2.1 我国生物天然气规划

生物天然气是欧洲能源领域发展的重要方向,据EBA/GIE生物甲烷地图披露,到2023年4月欧洲已建成1322个生产设施,比2021年增加了30%,产量超过35亿 m^3 。近年来,面对不断严峻的环境压力和能源需求,我国政府从发展规划、行业标准、技术方案、产品税收和政府补贴等方面出台了一系列发展生物天然气的利好政策,促进了生物天然气产业的快速发展^[32]。生物燃气的温室气体减排潜力大,与煤相比可有效降低环境影响能力(减弱率超32%),大力发展生物燃气产业对于我国“双碳目标”的实现具有重要作用^[33]。

2016年,国家能源局发布的《生物质能发展“十三五”规划》明确要求,到2020年生物天然气年

利用量 80 亿 m^3 , 支持建设 160 个县级示范项目, 新增投资金额约 1200 亿元, 是新增生物质发电项目投资 3 倍、生物质成型燃料供热项目投资 6 倍。2018 年, 国家能源局《关于请上报生物天然气产业化示范储备项目的通知》中, 提出生物天然气纳入能源发展战略和天然气发展战略, 政府补贴重点由发电转向燃气^[34]。2019 年, 国家能源局《关于促进生物天然气产业化发展的指导意见》中, 明确提出发展生物天然气, 以工业化规模化专业化方式处理城乡有机废弃物, 到 2025 年和 2030 年生物天然气年产量分别超过 100 和 200 亿 m^3 ^[35]。2021 年, 国家发展改革委、国家能源局等联合发布了《“十四五”可再生能源发展规划》, 明确要求加快发展生物天然气产业, 统筹规划建设千万立方米级生物天然气工程, 探索形成并入管网、车辆用气、锅炉燃烧和发电等多元应用模式^[36]。

目前, 受进口天然气价格高涨的影响, 国内现货进口量大幅降低, 去年上半年的现货进口量低于前年的 1/10^[37]。面对天然气的巨大缺口, 餐厨垃圾厌氧消化产沼气补充天然气供给可长期作为我国餐厨垃圾资源化处置的主流方式。

2.2 我国有机肥市场展望

垃圾分类政策的实施利于减少餐厨垃圾、厨余垃圾中重金属、有机污染物杂质的混入, 可有效保障堆肥产品的品质^[18]。长期以来, 我国针对有机肥用途、去向和产品质量等制定了一系列国家和行业标准, 达到了细化的分类管理要求, 但所规定的原料类型基本是农林类有机废弃物, 缺乏针对餐厨或厨余垃圾为原料的肥料土地利用标准^[38]。

2021 年 5 月, 农业农村部发布《有机肥料》(NY/T 525—2021) 行业标准, 明确有机肥生产原料分为 3 种类型, 即适用类、评估类和禁用类。厨余垃圾(包含餐厨垃圾)属于评价类原料, 通过安全评估后可用于有机肥料生产的原料, 所需评估的安全性指标包括盐分、油脂、蛋白质代谢产物胺类、黄曲霉素、种子发芽指数等。另一方面, 随着《到 2020 年化肥施用量零增长行动方案》和《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》等文件的相继落实, 餐厨垃圾制备有机肥市场将迎来广阔的发展前景^[18]。

餐厨垃圾等厨余类垃圾在生活垃圾中占比 40%~60%^[18]。按 10%~20% 的有机肥料产率计算, 将带动上百亿的有机肥市场。因此, 好氧堆肥技术对我国环保产业、绿色农业和循环经济的高质量

发展具有重要的推动作用, 未来也必将成为我国餐厨垃圾资源化处置的发展趋势。

2.3 餐厨垃圾资源化模式

基于上述餐厨垃圾特性、资源化技术主要特点、相关政策和标准的分析, 本文提出餐厨垃圾的资源化模式(见图 1)。该模式面向农业和能源产业延伸, 基于资源循环和能源转化的理念概括为“环农之道”和“环能之道”, 具体根据项目需求和市场可行性以“环能之道”或“环农之道”为主, 或两者的有机融合。

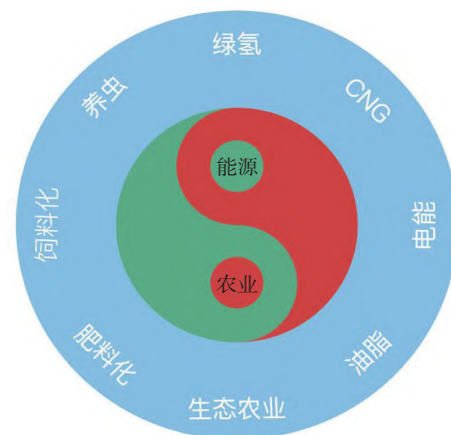


图 1 餐厨垃圾的资源化模式

图 1 中“能源”, 指餐厨垃圾资源化走环境和能源相结合的发展路径, 简称“环能之道”, 不同的能源利用方式随着颜色面积的增大能源环境效益等级递增。餐厨垃圾中含有的油脂经蒸煮提出后可用于生产生物柴油或进一步加工成航空燃油; 分离出来的杂质(占比 10%~24%)如塑料、纸张、竹木等可以进入焚烧设施发电; 针对餐厨垃圾高含水特性, 采用厌氧消化产沼技术, 经沼气提纯后可制取压缩天然气(CNG), 便于运输输送。另外, 为满足国家高质量发展和能源结构调整的要求, “氢能源”首次在 2019 年两会《政府工作报告》中提及, 随后国家颁布了《氢能产业发展中长期规划(2021~2035 年)》, 各地亦纷纷推出氢能产业政策, 助推氢能产业发展^[39]; 因此, 沼气部分氧化制氢、甲烷水蒸气重整制氢等技术研究与应用将利于餐厨垃圾资源化项目向绿氢项目升级转化。

图 1 中“农业”, 指餐厨垃圾资源化走环境和农业相结合的发展路径, 简称“环农之道”, 不同的农业利用方式随着颜色面积的增大农业环境效益等级递增。餐厨垃圾三相分离提油后的有机固渣资源化价值高, 根据其产生量和市场需求, 可以用于昆虫养

殖、生物饲料化和肥料化。长期以来,我国过量使用化肥,造成土壤板结、有机质水平和生产力下降等问题,不利于绿色农业发展。有机肥可促进土壤中功能性微生物的生长与繁殖,形成适于农作物生长的优势菌群,对土壤改良、农作物生长和病虫害防治有显著效果^[40]。在《到 2020 年化肥施用量零增长行动方案》和《有机肥料》(NY/T 525—2021)行业新标准等有利政策条件下,有机肥产业化发展将得到高度重视;因此,餐厨垃圾肥料化利于促进生态农业的大发展,将成为我国循环经济和农业可持续绿色发展的有力保障。

3 餐厨垃圾资源化技术路径

基于第 1 节和第 2 节的分析,目前餐厨垃圾处置和资源化主要技术路线是厌氧消化和好氧发酵。但是,单一的技术路线选择较难实现餐厨垃圾的全

效资源化。张靖雪^[41]等对比研究了餐厨垃圾三相分离后固液相混合与液相单独厌氧的产甲烷潜能,结果表明固液相混合较液相单独厌氧甲烷产量增加作用发挥有限(<10%),主要原因是高含固条件下的氨氮抑制导致微生物群落以 *Methanosarcina* 为主而非氢营养型产甲烷菌 *Methanoculleus*。由此可知,根据餐厨垃圾三相分离后固相和液相的特征,开展液相厌氧消化和固相好氧堆肥的技术协同,更利于提高餐厨垃圾的资源化率和经济效益。同时,结合市场需求,可将一部分固相用于昆虫养殖或饲料化;油脂进一步加工成生物柴油或航空燃油;沼气进一步提纯制 CNG 或绿氢;固相堆肥产品和沼渣/沼液作为肥料用于生态农业;餐厨垃圾分选物和堆肥后的筛上物用于焚烧发电,最终实现餐厨垃圾的全效资源化利用。各种餐厨垃圾资源化技术路线的耦合如图 2 所示。

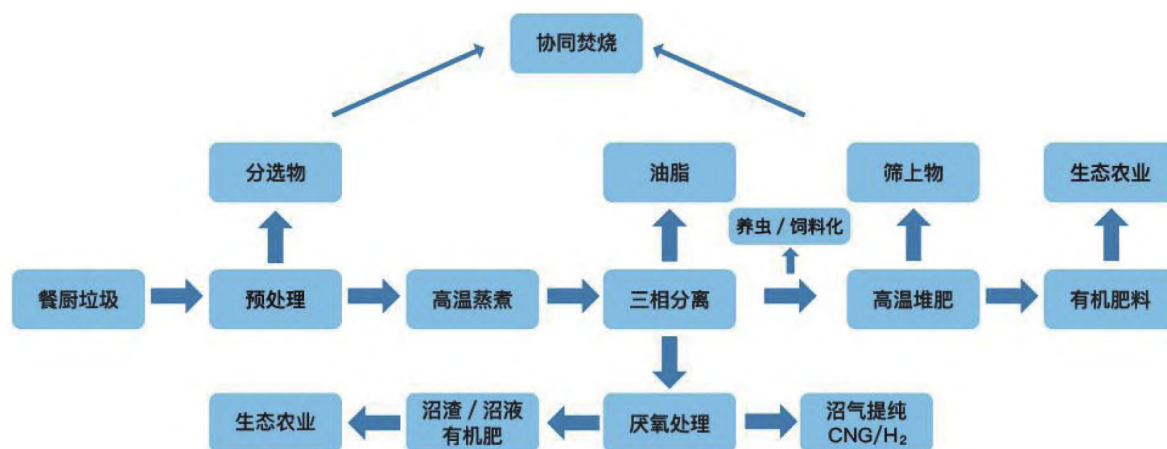


图 2 餐厨垃圾全效资源化技术路径图

餐厨垃圾资源化无论选用何种技术或技术组合,前端浆化-除杂预处理工艺都必不可少。目前,国内主要以机械式预处理为主,多采用杂质筛分、粗破碎、细破碎、压榨制浆等工艺组合形式,具有流程长、能耗高、堵卡缠频发和有机质损失大等问题^[16]。为此,中国环境保护集团有限公司针对餐厨垃圾高含水特性研发了水力疏解浆化-杂质分离一体化技术,集破碎-制浆-杂质分离于一体,与机械式预处理技术相比,具有流程短、投资少、能耗低等优点。该技术以柔和的水力作用为主,对塑料、织物、石块、金属、贝壳等杂质破坏作用小,却能使易腐有机质浆化成均匀细腻的浆液,通过抽浆和轻重杂排出过程,实现餐厨垃圾的高效浆化和杂质的精准分离。该技术目前已在多个工程项目中成功应用,可为餐厨垃圾

资源化技术融合和全效资源化模式实现提供有力支撑,具体流程如图 3 所示。

4 总结

我国餐厨垃圾资源化方式依据市场占有率大小分别为厌氧消化、好氧堆肥、饲料化和昆虫养殖等。由于单一技术的局限性,现有资源化项目较难实现餐厨垃圾的高效资源化。面对行业高质量发展的要求,多种技术的协同已成为必然,利于进一步挖掘出餐厨垃圾的资源化价值。本文在现有技术工艺分析的基础上提出了以“环能之道”和“环农之道”相结合的资源化模式,并且探讨了具体实施的技术路径,重点在于根据三相分离后固、液两相的理化特征将厌氧消化技术和好氧堆肥技术相融合,通过多

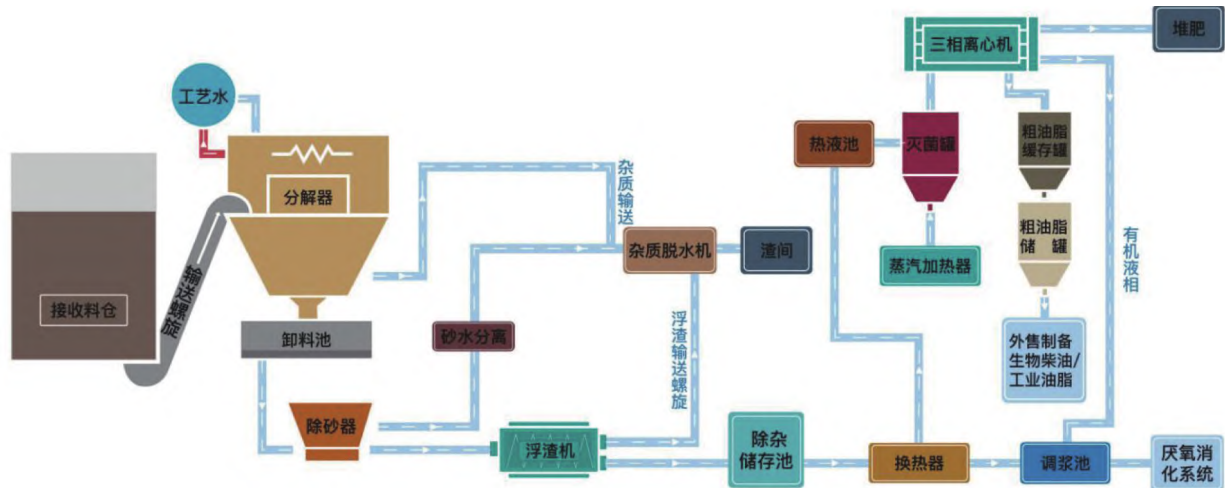


图3 基于水力浆化预处理技术的餐厨垃圾资源化工艺流程图

种技术协同形成油脂(生物柴油或航空燃油)、电能、CNG、绿氢和昆虫养殖、饲料化、肥料化、生态农业相结合的复合资源化模式。同时,本文提出了基于水力浆化-杂质分离预处理技术的餐厨垃圾资源化工艺流程,以保障各资源化产品的高质量。在具体实践过程中,相关资源化利用模式和技术路径的选择需根据项目规模、现场设施配套情况、当地市场条件和政策支持力度等灵活运用,以项目综合效益的最大化为目标。

参考文献:

- [1] 曹猛. 餐厨垃圾处理厂预处理工艺应用分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(09): 29-32.
- [2] 刘先凯. 餐厨垃圾湿式厌氧消化技术的研究及工程实例分析[J]. 山东化工, 2022, 51(18): 206-208.
- [3] 王小铭, 陈江亮, 谷萌, 等. “无废城市”建设背景下我国餐厨垃圾管理现状、问题与建议[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(6): 1-10+15.
- [4] 郑祥, 许海朋, 范庆文, 等. 餐厨垃圾厌氧消化处理技术研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(02): 10-14+18.
- [5] 任海静, 马一祎, 王攀. 我国城市餐厨垃圾处理与再生利用技术发展分析[J]. 建设科技, 2021(17): 26-30.
- [6] 谭业琴, 俞钟陆, 魏孔忠. “双碳”背景下中国餐厨垃圾处理现状及趋势[J]. 能源与节能, 2022(04): 63-65+68.
- [7] 阎中, 王婧瑶, 王凯军. 基于强化推流工艺(PFR)的餐厨垃圾堆肥微生物群落结构解析[J]. 中国沼气, 2020, 38(03): 3-9.
- [8] 崔艺燕, 邓盾, 田志梅, 等. 餐厨废弃物饲料化技术及其在动物生产中的应用[J]. 中国畜牧兽医, 2021, 48(12): 4478-4487.
- [9] 王叶, 喻国辉, 李义勇. 黑水虻处理有机废弃物技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2022(10): 129-135.
- [10] 王凯军, 王婧瑶, 左剑恶, 等. 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, 2020, 14(07): 1735-1742.
- [11] FRANCHETTI M. Economic and environmental analysis of four different configurations of anaerobic digestion for food waste to energy conversion using LCA for: a food service provider case study[J]. J Environ Manag, 2013(123): 42-48.
- [12] KHOO H, LIM T, TAN R. Food waste conversion options in Singapore: Environmental impacts based on an LCA perspective[J]. Sci Total Environ, 2010(408): 1367-1373.
- [13] WEN Z, WANG Y, CLERCQ D. What is the true value of food waste? A case study of technology integration in urban food waste treatment in Suzhou City, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016(118): 88-96.
- [14] CHUENHART W, LOGAN M, LEELAYOUTHAYOTIN C, et al. Enhancement of food waste thermophilic anaerobic digestion through synergistic effect with chicken manure[J]. Biomass and Bioenergy, 2020(136): 105541. 1-105541.11.
- [15] VARSHA S, SOOMRO A, BAIG Z, et al. Methane production from anaerobic mono-and co-digestion of kitchen waste and sewage sludge: synergy study on cumulative methane production and biodegradability[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020(32): 1-9.
- [16] SHI X, GUO X, ZUO J, et al. A comparative study of thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion of

- food waste and wheat straw: Process stability and microbial community structure shifts [J]. *Waste Management*, 2018 (75): 261–269.
- [17] YANG S, CHEN Z, WEN Q. Impacts of biochar on anaerobic digestion of swine manure: Methanogenesis and antibiotic resistance genes dissemination [J]. *Bioresour Technology*, 2021 (324): 124679.
- [18] 焦敏娜, 任秀娜, 王权, 等. 垃圾分类背景下易腐有机垃圾资源化处理模式探讨[J]. *环境卫生工程*, 2022, 30 (01): 28–35, 40.
- [19] 付锦涛, 侯磊, 侯振华, 等. 添加嗜热菌促进餐厨垃圾超高温堆肥发酵效果[J]. *现代化工*, 2022, 42 (S2): 311–314.
- [20] 勾长龙, 高云航, 刘淑霞, 等. 微生物菌剂对堆肥发酵影响的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2013 (6): 1244–1247.
- [21] 魏自民, 席北斗, 赵越, 等. 城市生活垃圾外源微生物堆肥对有机酸变化及堆肥腐熟度的影响[J]. *环境科学*, 2006 (02): 376–380.
- [22] 胡亚冬, 范德朋, 孔维杰, 等. 复合菌剂强化餐厨垃圾好氧生物处理性能研究[J]. *环境工程*, 2022, 40 (4): 97–105.
- [23] 付锦涛, 侯磊, 侯振华, 等. 添加嗜热菌促进餐厨垃圾超高温堆肥发酵效果[J]. *现代化工*, 2022, 42 (S2): 311–314.
- [24] 阎中, 王婧瑶, 王凯军. 基于强化推流工艺(PFR)的餐厨垃圾堆肥微生物群落结构解析[J]. *中国沼气*, 2020, 38 (03): 3–9.
- [25] LIN C, LAU K, PLEISSNER D. Recycling of food waste as nutrients in *Chlorella vulgaris* cultivation [J]. *Biore-source Technology*, 2014 (170): 144–151.
- [26] JINNO C, HE Y, MORASH D, et al. Enzymatic digestion turns food waste into feed for growing pigs [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2018: 48–58.
- [27] CHEN T, JIN Y, SHEN D. A safety analysis of food waste-derived animal feeds from three typical conversion techniques in China [J]. *Waste Management*, 2015, 45 (11): 42–50.
- [28] 杨丹丹, 潘冬梅, 刘圣鹏, 等. 餐厨垃圾乳酸菌发酵生产生物饲料的研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32 (26): 1–5.
- [29] 梁剑茹, 颜成, 王电站, 等. 餐厨垃圾渣蝇蛆转化工艺设备及处理效果中试研究[J]. *环境工程*, 2021, 39 (12): 166–171, 205.
- [30] 赖发英, 周颖, 王国锋, 等. 蚯蚓对农村有机生活垃圾分解处理的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (07): 1450–1455.
- [31] 孙立雯. 黑水虻工业化处理餐厨垃圾项目分析[J]. *广东化工*, 2022, 49 (18): 130–133.
- [32] 杨嘎吗, 穆廷桢, 杨茂华, 等. 生物燃气净化提纯制备生物天然气技术研究进展[J]. *过程工程学报*, 2021, 21 (06): 617–628.
- [33] 龚维政, 王静静, 刘伟伟, 等. “双碳”愿景下生物燃气工程的环境影响评价[J]. *中国农学通报*, 2023, 39 (09): 158–164.
- [34] 邱灶杨, 张超, 陈海平, 等. 现阶段我国生物天然气产业发展现状及建议[J]. *中国沼气*, 2019, 37 (06): 50–54.
- [35] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. 关于促进生物天然气产业化发展的指导意见[EB/OL]. [2019–12–04]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-12/26/content_5464147.htm.
- [36] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. “十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. [2021–10–21]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-10/21/c_1310611148.htm.
- [37] 申洪亮, 杨万莉, 张强. 2022年中国天然气市场供需预测及未来发展趋势分析[J]. *国际石油经济*, 2022, 30 (08): 41–50+100.
- [38] 王志杰, 何晶晶, 章骅, 等. 厌氧消化残余物土地利用的中外标准政策浅析[J]. *环境卫生工程*, 2022, 30 (01): 17–27.
- [39] 孙旭东, 赵玉莹, 李诗睿, 等. 我国地方性氢能发展政策的文本量化分析[J]. *化工进展*, 2023, 42 (07): 3478–3488.
- [40] 杨怀玉. 生物有机肥对农作物生长的促进作用[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27 (24): 96–97, 100.
- [41] 张靖雪, 李盼盼, 于洋, 等. 基于固液分离预处理的餐厨垃圾厌氧发酵技术研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42 (03): 1252–1258.