

甘蔗物料与餐厨垃圾协同厌氧发酵及工程参数分析

田启欢^{1,2}, 姚建刚^{1,2}, 谭婧^{1,2}, 陈尧³

(1. 杭州能源环境工程有限公司, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省生物燃料利用技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310014; 3. 广西维尔利环保技术开发有限公司, 广西 南宁 530112)

摘要: 以单一甘蔗物料、餐厨垃圾和两者混合物料开展厌氧发酵试验, 验证混合原料协同厌氧发酵生产生物沼气的良好性能, 并对混合物料的工程运行参数进行分析。结果表明, 餐厨垃圾与甘蔗物料的协同作用, 提升了甘蔗物料的日产气量, 减缓了餐厨垃圾单一物料日产气量的波动。混合物料的产气峰值较餐厨垃圾提前 4 d, 物料产气率和 TS 产气率分别为 $140.34 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $774.52 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$, 较甘蔗物料分别提高 55.63% 和 103.34%。餐厨垃圾的添加可明显提升甘蔗物料的甲烷含量和甲烷产率, 将餐厨垃圾与甘蔗物料进行混合发酵, 不仅能有效处理餐厨垃圾, 还能有效促进甘蔗物料的产气效率, 提高厌氧发酵装置产气效率。基于日处理甘蔗废弃物 100 t, 餐厨废弃物 10 t 的沼气工程, 混合物料产气率整体在 $100 \sim 150 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ 。CSTR 全混式厌氧反应器可使物料保持流动的全混状态, 混合物料 pH 值维持在 7.9 左右。混合物料厌氧发酵系统 CH_4 含量均值在 $59.63\% \pm 3.35\%$, 呈现较高的甲烷含量。可依据工程规模和利用途径, 用来发电并网、热电联产或提纯天然气等。

关键词: 甘蔗物料; 餐厨垃圾; 厌氧发酵; 协同发酵; 参数分析

中图分类号: S216.4; X705; X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2022)02-0027-05

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022020027

The Analysis of Co-fermentation of Sugarcane Materials and Food Waste and Its Engineering Parameters / TIAN Qi-huan^{1,2}, YAO Jian-gang^{1,2}, TAN Jing^{1,2}, CHEN Yao² / (1. Hangzhou Energy Environmental Engineering Co Ltd, Hangzhou 310020, China; 2. Zhejiang Province Key Laboratory of Biofuel, Hangzhou 310014, China; 3. Guangxi Welle Environmental Protection Technology Development Co Ltd, Nanning 530112, China)

Abstract: Anaerobic fermentation experiments were carried out with single sugarcane material, single food waste and the mixture of sugarcane and food waste to verify the performance of co-fermentation of mixed materials to produce biogas. The process parameters of engineering operation of mixed materials were analyzed. The results showed that the synergistic effect of food waste and sugarcane materials could increase the daily biogas production of sugarcane materials and slow down the fluctuation of daily biogas production of food waste. The peak biogas production of mixed materials was 4 days earlier than that of food waste. The biogas production rate of mixed materials and TS were $140.34 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ and $774.52 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$, respectively, which were 55.63% and 103.34% higher than those of sugarcane materials. The addition of food waste can obviously increase the methane content and the methane yield of sugarcane materials. The mixed fermentation of food waste and sugarcane materials could not only effectively treat food waste, but also effectively promoted the biogas production efficiency of sugarcane materials and improved the biogas production of anaerobic fermentation device. Based on the biogas project with treatment of $100 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ sugarcane waste and $10 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ food waste, the biogas production rate of mixed materials was $100 \sim 150 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$, which was consistent with the biogas production rate of mixed materials above. The CSTR fully mixed anaerobic reactor could keep the material flowing in a completely mixed state, and the pH value of the mixed material was maintained at about 7.9. The CH_4 content in the mixed material anaerobic fermentation system was $59.63\% \pm 3.35\%$, showing a high methane content. According to the project scale and utilization way, biogas could be used for power generation, cogeneration or purification.

Key words: sugarcane material; food waste; anaerobic fermentation; co-fermentation; parameter analysis

随着经济的快速发展和人民生活水平日益提高, 能源短缺问题不断显现, 生物质能因其清洁安

全、资源丰富、环境友好等优点被视为最有潜力的可再生能源之一^[1]。南方地区甘蔗的年产量达 7000

收稿日期: 2021-09-08 修回日期: 2021-10-14

作者简介: 田启欢(1990-), 男, 汉族, 河南商丘人, 硕士, 主要从事生物质能源综合利用工作, E-mail: tianqihuan@heee-biogas.com

万 t, 基于甘蔗渣的综合利用, 符合国家倡导的可再生能源发展规划的生物燃料基础原料^[2]。餐厨垃圾是指居民生活、食品加工、饮食服务等活动中产生的食物废料, 是第二大城市生活垃圾产生源^[3]。将餐厨垃圾进行厌氧发酵进行资源和能源化, 由于高油脂、高盐分、高蛋白、高 COD 含量、低 pH 值等特点, 容易导致发酵体系酸化, 单纯餐厨垃圾厌氧发酵的问题有较多研究和工程案例^[4-5]。采取有效措施处理甘蔗渣和餐厨垃圾是实现有机废弃物资源化利用, 推进城市绿色可持续发展的关键。沼气生产的农业废弃物主要是秸秆和动物粪便, 对单一形式的原料已不能满足迅速发展的沼气工程建设, 因此需要探索多种原料混合发酵协同生产生物沼气的技术工艺^[6]。由于甘蔗渣等农林废弃物 C/N 较高, 而餐厨垃圾通常具有高盐、高油、高蛋白的特性, 将两者进行共发酵能够有效地相互促进, 在发酵底物中形成最佳的营养供给, 从而充分地保证了微生物的活性, 促进微生物的生长, 调节发酵系统的缓冲能力, 使厌氧发酵高效稳定运行, 提高沼气产量^[7]。混合发酵同时预处理发酵原料, 同时也有效提高发酵原料的生物质能转化率。与餐厨垃圾相比甘蔗渣酸化时间相对较长, 将两者进行混合发酵可以缓解餐厨垃圾的酸化程度, 避免厌氧细菌生长被抑制, 提高厌氧发酵系统的稳定性。通过餐厨垃圾与甘蔗渣、牛

粪等的共发酵可以更好地提高厌氧发酵系统的稳定性, 改善营养平衡和有机负荷, 降低化合物的毒性^[8-9]。

本试验以实现废弃物的资源化利用为宗旨, 着重关注于甘蔗物料和餐厨垃圾混合发酵生产生物质绿色能源沼气。试验过程分别以餐厨垃圾、甘蔗物料作为单一物料进行厌氧发酵, 同时以混合物料厌氧发酵, 通过对比产甲烷效果, 验证混合原料协同厌氧发酵生产生物沼气的良好性能。并通过混合物料的工程运行的过程参数分析, 为甘蔗物料和餐厨垃圾的资源化利用问题提供一定的技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验餐厨垃圾来自广西南宁市武鸣区各高校及饭店, 经过人工将塑料袋、瓶盖、筷子等杂质筛分, 破碎挤压后得到的浆料。甘蔗物料取自武鸣区甘蔗种植地甘蔗秸秆及废弃尾叶等, 经过破碎机破碎后, 人工剪至粒径小于 2 cm。接种物取自广西维尔利环保技术开发有限公司正常运行的生物天然气项目的厌氧消化沼液池。

本试验餐厨垃圾、甘蔗物料和接种物, 具体成分见表 1。

表 1 原料理化特性

(%)

检测项目	TS	VS/TS	pH 值	粗脂肪干基	粗蛋白干基	C/N
餐厨垃圾	18.97	93.18	3.72	7.2	6.9	15.5
甘蔗物料	23.68	95.47	—	—	—	84.2
混合物料	18.12	91.96	6.17	—	—	—
接种物	4.77	47.37	8.04	—	—	10.2

1.2 试验装置

本试验采用 1000 mL 的广口瓶作为厌氧发酵瓶, 集气瓶 1000 mL 和排水量筒 1000 mL 组合。发酵瓶置于恒温水浴锅中, 温度控制在为 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。广口瓶用橡胶塞密封, 塞上插入不锈钢管导气, 发酵装置和集气装置用乳胶管连接。采用排水集气法收集沼气。

1.3 实验方法

发酵潜力试验设置餐厨垃圾、甘蔗物料两种单一物料, 混合物料为模拟工程运行的配比物料(按鲜重比甘蔗物料: 餐厨垃圾 = 10: 1)。为了防止试验中受到酸抑制和保证较好的物质扩散, 基于

$\text{VS}_{\text{底物}}/\text{VS}_{\text{菌种}} \leq 0.5$, 分别取 30 g、25 g、45 g 置于发酵瓶中, 接种率按德国 VDI 能源手册, 加入接种物 600 g, 充分混合均匀后密封, 置于温度为 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴锅中。每日早晚手动摇晃发酵瓶 1 次, 定时测量产气量, 同时测量 CH_4 含量。每组试验均设置 3 组平行组。

混合物料沼气工程项目利用甘蔗物料和餐厨垃圾混合, 采用 CSTR 全混式厌氧发酵罐经中温厌氧发酵产沼气, 利用膜分离沼气提纯净化工艺, 去除其中的 H_2S 、 CO_2 等主要杂质, 再经脱水压缩成为高压生物天然气。

1.4 检测方法

原料的总固体(Total solid, TS)与挥发性固体(Volatile solid, VS)的测定采用重量法;采用沼气分析仪(ADOS-Biogas 401, ADOS, 德国)测试沼气成分;批式试验沼气流量采用排水法测量,沼气工程采用热质式流量计(Proline t-mass 65, Endress + Hauser, 德国)测量沼气流量;采用便携式 pH 计(PHS-2C, 雷磁)测定 pH 值。其他指标外送正规机构检测。

2 结果与讨论

2.1 不同物料产气特性

2.1.1 不同物料日产气量特性

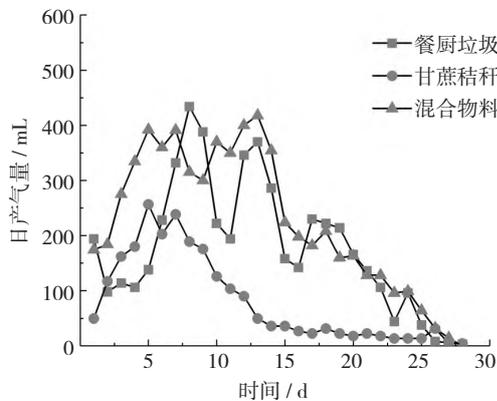


图1 不同物料日产沼气量

不同物料厌氧发酵日产气量情况如图1所示。餐厨垃圾日产气规律不同于其他两种物料,是由于其蛋白质、油脂等有机物含量高,在微生物作用下易被分解。发酵过程初期产酸菌群利用物料中的可溶性有机物,产生挥发性脂肪酸累积,造成体系 pH 值下降,导致产甲烷菌活性受到抑制^[10-11],产气量会在一段时间内有较大的波动,出现多个产气峰值。混合物料的产气较餐厨垃圾波动小,秸秆的纤维结构提高了物料的孔隙率,增强了餐厨物料对微生物环境的缓冲能力,更加适宜产甲烷微生物的生存^[12]。餐厨垃圾的日产气峰值出现在第8天和第13天,分别为434.0 mL和370.0 mL。混合物料产气峰值较餐厨垃圾提前,为4 d和13 d,产气量分别为392.0 mL和418.0 mL。甘蔗物料日产气量呈现先增加后减少的规律,产气峰值出现在第5天,为256.5 mL。

2.1.2 不同物料产气率特性

图2为不同物料厌氧发酵产气率情况。一般认

为物料反应初期气体成分主要是 CO_2 和 H_2 等,随着反应时间的进行,产气率逐渐趋于平缓。餐厨垃圾物料产气率最高,为 $167.32 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,混合物料产气率为 $140.34 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,单一甘蔗物料则为 $90.18 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。依据本研究可知,甘蔗秸秆中混入 9.09% 的餐厨垃圾,整体的物料产气率较单一的甘蔗物料提高 55.63%。混合物料累积产气速率较其他两种物料平缓,是由于甘蔗物料与餐厨垃圾进行协调共发酵有利于维持发酵系统的稳定性^[13],随着甘蔗物料产气性能减弱,产气性能与餐厨垃圾保持一致。

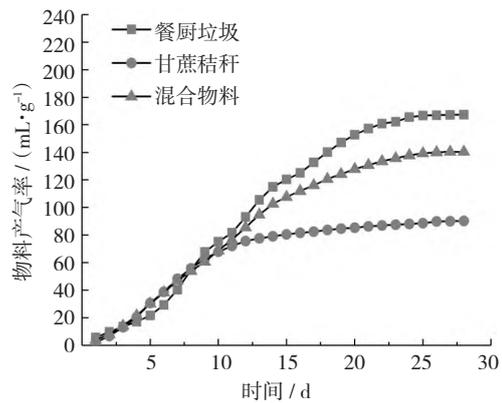


图2 不同物料产沼气率

2.1.3 不同物料 TS、VS 及甲烷产气特性

物料 TS 和 VS/TS 是厌氧发酵的重要参数,由表1数据可知,餐厨垃圾和甘蔗物料的有机含量均较高,VS/TS 高达 90%^[14]。从表2可以看出,混合物料的 TS 产气率为 $774.52 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$,较甘蔗物料提高 103.34%。同时对比产气时间 T50 和 T70,混合物料较餐厨垃圾均提前,由于产气周期的增加,较甘蔗物料分别退后 4 d 和 5 d。甲烷含量及甲烷产气率方面,餐厨垃圾的添加可明显提升甘蔗物料的甲烷含量和甲烷产率。将餐厨垃圾与甘蔗物料进行混合发酵,不仅有效处理餐厨垃圾,还有效促进甘蔗物料的产气效率,与餐厨垃圾和甘蔗物料单独厌氧发酵相比,混合物料厌氧消化的产甲烷效率提高,厌氧发酵装置产气效率也有提高。

2.2 混合物料沼气工程运行参数分析

2.2.1 日处理量及物料产气率参数变化

本项目日处理甘蔗物料 100 t,餐厨废弃物 10 t。取正常运行 80 d 的一个产气区间为对象,分析日处理量与物料产气率的关系,如图3所示。在运行区间内,由于原料和设备运行问题,甘蔗物料和餐厨垃圾进料量的变化,物料产气率出现上下波动,物料产

表2 原料产气率特性

检测项目	T50	T70	TS 产气率	VS 产气率	甲烷含量	甲烷产气率
	d	d	(mL·g ⁻¹ TS)	(mL·g ⁻¹ VS)	%	(mL·g ⁻¹ VS)
餐厨垃圾	15	18	882.02	946.58	64.22 ± 2.00	607.89
甘蔗物料	10	12	380.83	398.90	54.26 ± 1.60	216.44
混合物料	14	17	774.52	842.24	60.04 ± 2.35	505.68

注: T50, T70, T90 分别表示物料在厌氧发酵一个周期内达到总产气量的 50%, 70%, 90% 所需要的时间。

气率整体在 100 ~ 150 m³·t⁻¹ 波动, 与上文混合物料产气率相符。

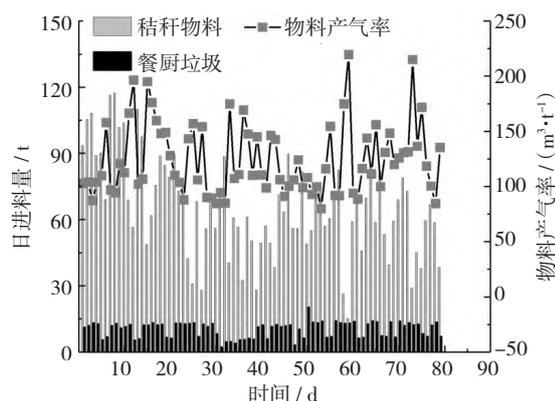


图3 混合物料投入量与物料产气率的关系

2.2.2 pH 值参数变化

混合物料厌氧发酵体系 pH 值变化如图 4 所示, 可知厌氧罐内混合物料 pH 值始种处于一种相对稳定状态, pH 值维持在 7.9 左右, 该条件下厌氧发酵体系微生物活性好, 产甲烷性能稳定^[15]。二级厌氧罐物料 pH 值较一级厌氧罐稳定, CSTR 全混式厌氧反应器可使物料保持流动的全混状态, 保证发酵原料与微生物的接触, 避免物料局部酸化等现象。

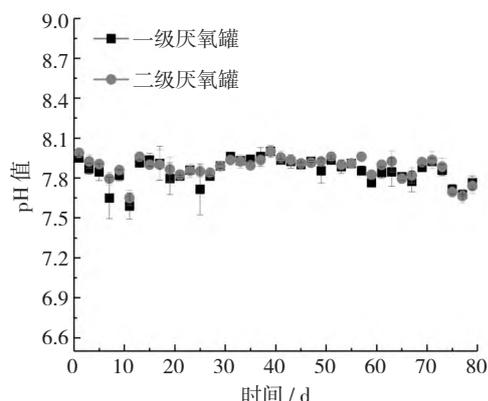
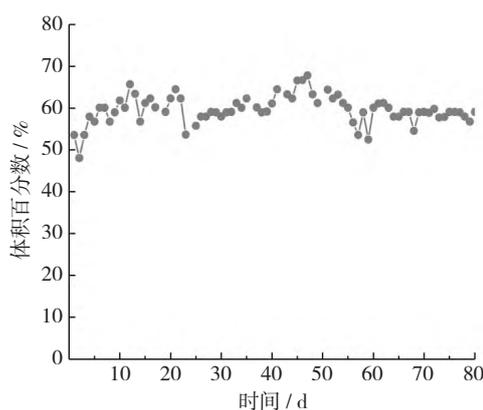


图4 混合物料厌氧发酵体系 pH 值

2.2.3 CH₄ 含量参数变化及利用方式

图 5 为混合物料厌氧发酵系统在 80 d 区间内的 CH₄ 含量, 可见发酵体系 CH₄ 含量较平稳, 均值为 59.63% ± 3.35%, 呈现较高的甲烷含量。该项目为中央预算内规模化生物天然气工程试点项目, 以设计日产沼气的量 4.11 万 Nm³ (甲烷含量按 60% 计), 沼气经过脱硫、脱水、膜分离等工艺提纯后获得的生物燃气甲烷含量可达 97% 以上, 经净化提纯后日产生物天然气 2 万 Nm³, 年产生物天然气 730 万 Nm³。生物天然气热值完全满足 GB18047—2000 车用压缩天然气要求, 符合 GB17820—1999 天然气 II 类以上标准, 可用作车用燃气或并入城镇天然气管网^[16]。在项目调试运行中, 1 m³ 沼气通过提纯净化后可转化天然气 0.55 m³ 以上。

沼气一般可根据建设规模和用途, 除提纯作天然气, 还可用来发电并网、热电联产等。沼气具有较高的热值 (20 ~ 23 MJ·m⁻³), 国产机组电效率在 30% ~ 35%, 1 m³ 沼气 (CH₄ 含量 55% ~ 65%) 可发电 1.8 kW·h 左右; 国外机组电效率 35% ~ 42%, 1 m³ 沼气则可发电 2.0 ~ 2.2 kW·h。基于沼气热电联产是一种同时满足热 (冷)、电等多种能量需求的能源供给方式, 可选择“以电定热”、“以热定电”等多种模式。

图5 混合物料厌氧发酵体系 CH₄ 含量

3 结论

(1) 餐厨垃圾的加入, 提升了甘蔗物料的日产气量, 协同作用下减缓了餐厨垃圾单一物料日产气

量的波动。混合物料的产气峰值较餐厨垃圾提前,混合物料产气峰值为第4天,餐厨垃圾的日产气峰值出现在第8天。餐厨垃圾物料产气率最高,混合物料产气率为 $140.34 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,单一甘蔗物料则为 $90.18 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,混合物料产气率较单一的甘蔗物料提高 55.63%。混合物料的 TS 产气率为 $774.52 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ TS,较甘蔗物料提高 103.34%。餐厨垃圾的添加可明显提升甘蔗物料的甲烷含量和甲烷产率。将餐厨垃圾与甘蔗物料进行混合发酵,不仅有效处理餐厨垃圾,还有效促进甘蔗物料的产气效率,提高厌氧发酵装置的产气效率。

(2)基于日处理甘蔗废弃物 100 t,餐厨废弃物 10 t 的沼气工程,混合物料产气率整体在 $100 \sim 150 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$,与上文混合物料产气率相符。CSTR 全混式厌氧反应器可使物料保持流动的全混状态,pH 值维持在 7.9 左右。混合物料厌氧发酵系统 CH_4 含量均值在 $59.63\% \pm 3.35\%$,呈现较高的甲烷含量。在项目调试运行中, 1 m^3 沼气通过提纯净化后可转化天然气 0.55 m^3 以上,可依据工程规模和利用途径,用来发电并网、热电联产或提纯天然气等。

参考文献:

- [1] Li X, Hou S, Su M, et al. Major energy plants and their potential for bioenergy development in China [J]. *Environmental Management*, 2010, 46(4): 579 – 589.
- [2] Qiu H, Huang J, Yang J, et al. Bioethanol development in China and the potential impacts on its agricultural economy [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(1): 76 – 83.
- [3] 崔亚伟, 陈金发. 厨余垃圾的资源化现状及前景展望 [J]. *中国资源综合利用*, 2006, 24(10): 31 – 32.
- [4] 王星, 王德汉, 李俊飞, 等. 餐厨垃圾的厌氧消化技术现状分析 [J]. *中国沼气*, 2006(02): 35 – 39.
- [5] 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.
- [6] Deng Y, Huang Z, Zhao M, et al. Effects of co-inoculating rice straw with ruminal microbiota and anaerobic sludge: digestion performance and spatial distribution of microbial communities [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2017, 101(14): 5937 – 5948.
- [7] Shah F A, Mahmood Q, Rashid N, et al. Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 627 – 642.
- [8] 李荣平, 刘研萍, 李秀金. 厨余和牛粪混合厌氧发酵产气性能试验研究 [J]. *可再生能源*, 2008, 26(2): 64 – 68.
- [9] Serrano A, Siles J A, Chica A F, et al. Agri-food waste valorization through anaerobic co-digestion: fish and strawberry residues [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 54(9): 125 – 132.
- [10] Zhang C, Su H, Baeyens J, et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production [J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38(Oct.): 383 – 392.
- [11] 冯磊, 寇宏丽, 张旭东, 等. 餐厨垃圾中高温高固体厌氧消化过程中的 pH 和氨氮抑制 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(9): 5100 – 5106.
- [12] 罗娟, 赵立欣, 姚宗路, 等. 甘蔗叶添加对餐厨垃圾厌氧消化性能的影响 [J]. *中国沼气*, 2017, 04: 23 – 28.
- [13] 程亚莉. 甘蔗渣和餐厨垃圾共发酵产沼气研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [14] Zhang C, Xiao G, Peng L, et al. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 129(Complete): 170 – 176.
- [15] 程亚莉, 毕桂灿, 沃德芳, 等. 国内外餐厨垃圾现状及其处理措施 [J]. *新能源进展*, 2017, 5(4): 266 – 271.
- [16] 包海军. 我国沼气提纯技术及生物天然气产业发展情况 [J]. *中国沼气*, 2021, 39(1): 54 – 58.