

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.20.019

# 中高温过渡区餐厨垃圾厌氧工程案例分析

李月中<sup>1</sup>, 谭 婧<sup>2</sup>, 宫亚斌<sup>2</sup>, 寿亦丰<sup>2</sup>

(1. 维尔利环保科技集团股份有限公司, 江苏 常州 213125; 2. 杭州能源环境工程有限公司, 浙江 杭州 310020)

**摘 要:** 厌氧发酵是餐厨垃圾无害化和资源化处理的重要技术手段,而温度是影响厌氧发酵的重要参数。西安市餐厨垃圾资源化利用和无害化处理项目(一期)的厌氧工段采用优化发酵条件,着重介绍了中温和高温过渡区发酵温度为 43~45℃ 时的餐厨垃圾厌氧发酵技术,并对项目稳定运行期的生产数据进行分析总结。结果表明,采用中温和高温过渡区厌氧发酵技术,有机负荷率高,垃圾挥发性固体(VS)产气率达到 1 170 m<sup>3</sup>/tVS,全混发酵 CSTR 发酵装置容积产气率达 3.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d) 以上,取得了良好运行效果。

**关键词:** 餐厨垃圾; 温度; 厌氧发酵; 沼气

**中图分类号:** TU993 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)20-0106-06

## Case Study of a Food Waste Anaerobic Digestion Biogas Project at Mesophilic and Thermophilic Temperature

LI Yue-zhong<sup>1</sup>, TAN Jing<sup>2</sup>, GONG Ya-bin<sup>2</sup>, SHOU Yi-feng<sup>2</sup>

(1. WELLE Environmental Group Co. Ltd., Changzhou 213125, China; 2. Hangzhou Energy & Environmental Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** Anaerobic digestion is an important technology for harmless and resource treatment of food waste, and temperature is an important affecting parameter. The fermentation technology at mesophilic and thermophilic temperature (43–45℃) adopted in the anaerobic section of Xi'an food waste biogas project (phase I) is introduced, and the stable operation data of the project are analyzed and summarized. The results show that by using the anaerobic digestion technology at mesophilic and thermophilic temperature, the organic load rate is high, the gas production rate of volatile solid (VS) of waste is 1 170 m<sup>3</sup>/tVS, and the volume gas production rate of full mixed CSTR fermentation unit is more than 3.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), so that good operation results are achieved.

**Key words:** food waste; temperature; anaerobic digestion; biogas

随着我国社会经济的快速发展及城镇化的推进,城市生活垃圾清运量不断增长。根据中国统计年鉴数据,2018 年全国城市生活垃圾清运总量为 22 801.8 × 10<sup>4</sup> t,其中湿垃圾占比为 36.5% ~

76.0%<sup>[1]</sup>。湿垃圾主要组分是食品、餐饮垃圾等,整体呈现有机物含量高、营养物质丰富、易降解、易腐败等特性<sup>[2]</sup>。厌氧发酵是实现湿垃圾减量化、无害化及资源回收的重要手段,目前被广泛用于城市

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2020035); 2021 年度浙江省省级重点研发计划项目(2021C03024)  
通信作者:宫亚斌 E-mail:gongyabin@heee-biogas.com

湿垃圾处理<sup>[3-4]</sup>。

温度是影响厌氧发酵产甲烷效率的重要因素之一,会影响产甲烷相关微生物的代谢速率和底物供应<sup>[5-6]</sup>。一般认为,从对温度的适应性方面,可将厌氧微生物分为高温菌和中温菌两大类,即厌氧发酵可分为高温发酵(50~55℃)和中温发酵(35~40℃)两大类,43~45℃则被称为过渡区,既不属于中温范围,也不属于高温范围,常规理论认为,厌氧微生物在此温度范围内活性较低,是低速厌氧区。但Nohd等<sup>[7]</sup>关于污泥厌氧处理的研究结果表明,45℃条件下厌氧发酵产甲烷效率与35℃相比未出现大幅下降,且45℃条件下的产沼气效率要高于55℃。李美群<sup>[8]</sup>在研究薯类酒糟厌氧发酵时发现,45℃条件下厌氧发酵产气率最高,且测得厌氧产酸菌、厌氧硫化菌和厌氧纤维素菌生长、繁殖的速度最快。

2018年杭州能源环境工程有限公司(以下简称杭能环境)对餐厨垃圾、牛粪、酒糟、秸秆等多种原料在中温、中高温过渡区及高温条件下的厌氧发酵进行了系列试验研究,发现这几类物料在中高温过渡区条件下产沼速率较中温和高温发酵条件下均有

明显提升。2019年公司将该研发成果<sup>[9-10]</sup>在维尔利环保科技集团股份有限公司投资运营的西安、常州等几个大型餐厨沼气项目上进行了验证。笔者以西安市餐厨垃圾资源化利用和无害化处理项目(一期)为案例,介绍在中温和高温过渡区发酵温度下,厌氧发酵技术的应用情况,并对项目2019年9月22日—2020年1月8日期间稳定运行的数据进行监测和分析,以期研究温度对厌氧发酵效率的影响提供一些参考。

## 1 项目概况

西安市餐厨垃圾资源化利用和无害化处理项目(一期)厂址位于福银高速以西八兴滩村,占地2.5hm<sup>2</sup>,设计处理规模为餐厨垃圾200t/d、地沟油20t/d,采用维尔利环保科技集团股份有限公司的预处理技术及杭能环境的中高温厌氧发酵技术,设计吨原生垃圾沼气产量不小于71m<sup>3</sup>,设计日产沼气15000m<sup>3</sup>/d。该项目于2019年1月开始启动调试,已稳定运行两年。

该项目采用机械分选、提油预处理+中高温厌氧消化+沼气净化发电+沼渣脱水处置工艺路线,工艺流程见图1。

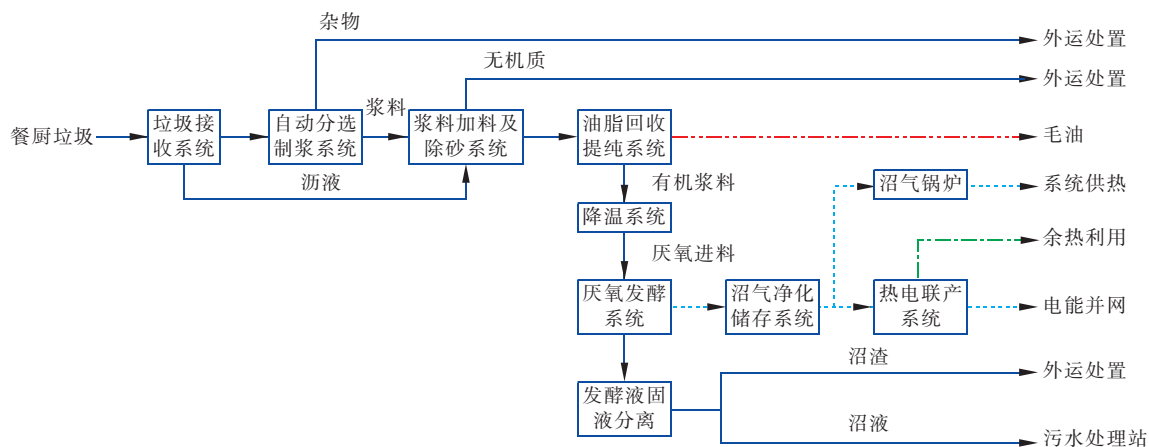


图1 餐厨垃圾厌氧发酵工艺流程

Fig. 1 Anaerobic fermentation process of kitchen wastes treatment

餐厨垃圾运输车到达现场后首先过磅,然后驶进卸料大厅并将餐厨垃圾倒入接料装置的卸料斗,料斗底部滤液进入浆料加热及除砂系统。料斗中的物料输送至后续自动分选制浆系统,自动分选机的主要功能是对餐厨垃圾中的塑料、织物及硬质不易破碎的无机物(如金属等)进行分离,同时通过特殊设计的转锤对食物残渣进行浆化处理,产生的有机

粗浆料通过浆料输送泵送入浆料加热机。浆料加热机对有机粗浆料进行加热,加热后的浆料及滤液经惰性物分离装置和除砂处理后由泵输送至三相提油机进行提油,而提油过程中分离的有机浆料经换热器降温后进入后续厌氧系统进行厌氧发酵。

预处理后的物料浆液泵入CSTR厌氧消化系统进行中高温过渡区[发酵温度(44±1)℃]厌氧消

化,所产沼气经生物脱硫净化后暂存于双膜干式贮气柜,部分沼气用于锅炉燃烧生产蒸汽,为预处理三相提油增温提供热量,剩余沼气用于热电联产,电能并网,余热用于其他供热。发酵液经固液分离后,沼液进入厂内污水处理系统处理,达到《黄河流域(陕西段)污水综合处理排放标准》(DB 61/224—2011)的二级标准后排入附近污水处理厂进一步处理,固渣外运填埋。

## 2 厌氧系统运行状况

### 2.1 厌氧发酵基本参数

餐厨垃圾经前端分选筛分预处理及三相提油后的浆料温度超过  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,为了满足过渡区发酵温度要求 $[(44 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}]$ ,浆料在进入厌氧罐之前通过冷却塔降温处理。

餐厨浆料主要性质如表1所示。

表1 餐厨浆料主要性质参数(平均值)

Tab.1 Main property parameters of kitchen wastes (average value)

项 目	数 值
进料量/( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ )	175.6
进料 TS/%	11.35
进料 VS 与 TS 比值/%	77.8
进料 COD/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	143 575
进料温度/ $^{\circ}\text{C}$	45.2
进料 pH 值	4.1

厌氧发酵系统采用杭能环境研发的餐厨垃圾高效厌氧 CSTR 优化技术。为了提高厌氧转化效率,同时节省浆料降温能耗,厌氧发酵在传统中温厌氧发酵基础上进行了一系列优化。厌氧发酵主要设计参数如表2所示。

表2 厌氧发酵工艺参数(平均值)

Tab.2 Anaerobic digestion process parameters (average value)

项 目	数 值
发酵温度/ $^{\circ}\text{C}$	$44 \pm 1$
有机负荷/( $\text{kgVS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )	3.4
容积产气率/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )	3.60
水力停留时间/d	22
VS 产气率/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	1 170
VS 降解率/%	80
沼气产量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	18 527
甲烷浓度/%	60

### 2.2 厌氧罐进料及沼气产量

受垃圾收运量的影响,运行期间厌氧罐进料量

存在一定范围的波动(见图2)。由图2可以看出,厌氧罐进料量在  $108 \sim 211\text{ t/d}$  之间波动,平均进料量为  $175.6\text{ t/d}$ ;随着进料量的波动,沼气产量也在  $12\,500 \sim 25\,000\text{ m}^3/\text{d}$  范围内波动,平均沼气产量为  $18\,527\text{ m}^3/\text{d}$ 。据此计算,餐厨浆料产气量可达  $105.5\text{ m}^3/\text{t}$ 。

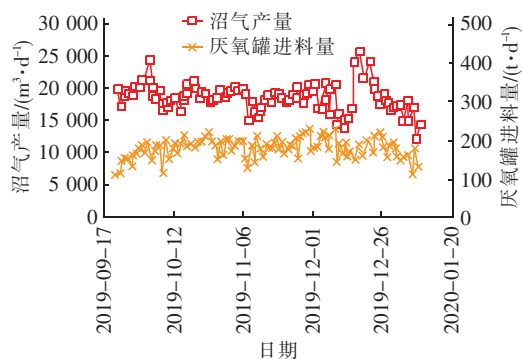


图2 厌氧进料量与沼气产量

Fig.2 Anaerobic feed and biogas production

### 2.3 厌氧发酵过程的 TS 去除率

厌氧发酵过程的 TS 去除率变化如图3所示。运行期间厌氧罐进料 TS 浓度在  $8.8\% \sim 14.6\%$  范围内波动,大部分时间为  $11\% \sim 12\%$ ,平均值为  $11.35\%$ ;出料 TS 浓度在  $4.3\% \sim 5.6\%$  范围内波动,平均值为  $4.8\%$ ;TS 去除率波动范围为  $52\% \sim 72\%$ ,平均值为  $63\%$ ,优于李靖等<sup>[11]</sup>的研究结果 $[(35 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下,TS 最大去除率为  $43.6\%$ ]。

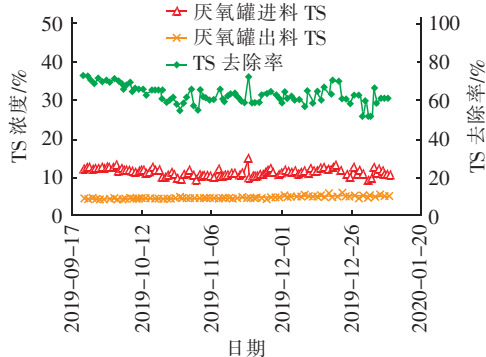


图3 厌氧发酵过程 TS 去除率

Fig.3 TS removal efficiency of anaerobic digestion process

### 2.4 厌氧发酵过程的 VS 去除率

厌氧发酵过程的 VS 去除率见图4。在运行期间厌氧罐进料 VS/TS 在  $72.3\% \sim 87.6\%$  范围内波动,平均值为  $77.8\%$ ;出料 VS/TS 在  $40.4\% \sim 45.0\%$  范围内波动,平均值为  $42.3\%$ ;VS 去除率在

75.2%~86%范围内波动,平均值为79.7%,该结果优于梅冰等<sup>[12]</sup>的研究结果(稳定运行阶段VS去除率为40.2%)。

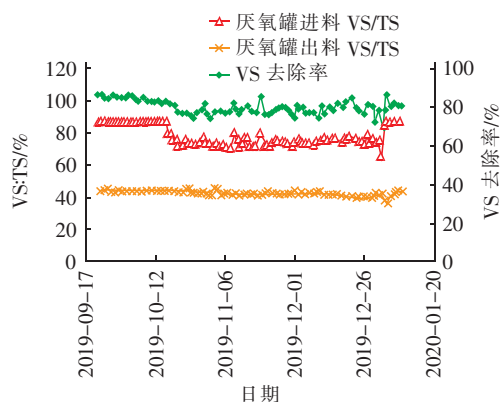


图4 厌氧发酵过程VS去除率

Fig. 4 VS removal efficiency of anaerobic digestion process

## 2.5 厌氧发酵过程的VS负荷和VS产气率

厌氧VS负荷及VS产气率变化见图5。在运行期间厌氧罐VS负荷在 $2.0 \sim 4.7 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 范围内波动,平均值为 $3.4 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;VS产气率平均值为 $1170 \text{ m}^3/\text{tVS}$ ,该结果优于韩艳霞等<sup>[13]</sup>报道的 $55^\circ\text{C}$ 高温条件下的研究结果(稳定运行阶段VS产气率为 $809 \text{ m}^3/\text{tVS}$ ),也优于Tanimu<sup>[14]</sup>、张存胜<sup>[15]</sup>中温 $35 \sim 37^\circ\text{C}$ 条件下的研究结果(同等负荷下,VS产气率分别为 $900, 888 \text{ m}^3/\text{tVS}$ )。

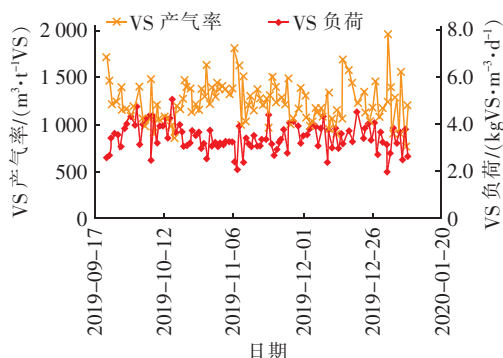


图5 厌氧发酵VS负荷与VS产气率

Fig. 5 VS load and VS gas production rate of anaerobic digestion process

厌氧发酵VS负荷及容积产气率变化见图6。在运行期间,当厌氧罐VS负荷在 $2.0 \sim 4.7 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 范围内波动时,容积产气率平均值为 $3.6 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,略高于李政伟<sup>[16]</sup>的高温( $55 \pm 1^\circ\text{C}$ )条件下的研究结果[同等有机负荷条件下,容积产气率约 $3.0 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ]。

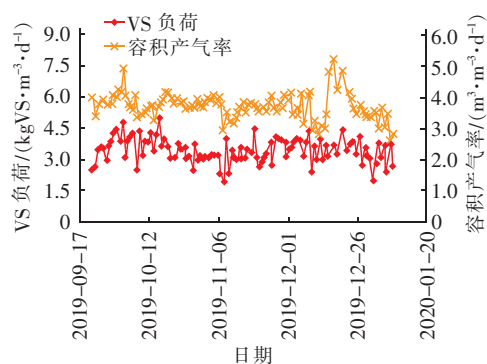


图6 厌氧发酵VS负荷与容积产气率

Fig. 6 VS load and volumetric gas production rate of anaerobic digestion

## 2.6 发酵液氨氮与VFA

发酵液氨氮与VFA变化见图7。

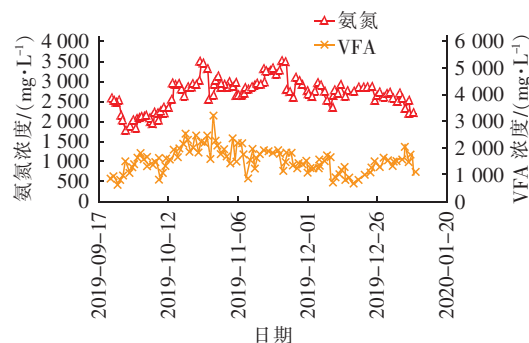


图7 厌氧罐内氨氮浓度与VFA浓度

Fig. 7 Concentration of ammonia nitrogen and VFA in anaerobic tank

运行期间厌氧罐内氨氮浓度波动较大,这可能与收运的垃圾组分随季节变化有关,其波动范围为 $1775 \sim 3510 \text{ mg/L}$ ,平均值为 $2688 \text{ mg/L}$ ;罐内VFA浓度为 $649 \sim 3275 \text{ mg/L}$ ,平均值为 $1543 \text{ mg/L}$ ;有研究认为,氨氮浓度达到 $1500 \sim 3000 \text{ mg/L}$ 时厌氧消化体系开始受到抑制<sup>[17]</sup>,但可以通过生物驯化方式不断提高厌氧菌耐受氨氮的能力<sup>[18-19]</sup>。本项目自2019年1月调试启动,截至本研究监测时厌氧微生物已经过长达8个月的驯化,即便在氨氮浓度高于 $3000 \text{ mg/L}$ 时,厌氧系统仍正常运行,VFA一直处于较低水平。

## 2.7 发酵液pH值及碱度

厌氧罐内pH值及碱度变化见图8。厌氧进料pH值较低( $3.4 \sim 4.7$ ),监测期间进料pH值的平均值为4.1;厌氧罐内pH值比较稳定,在 $7.5 \sim 8.0$ 范围内小幅波动,平均值为7.8;厌氧罐内碱度在



10 500 ~ 14 500 mg/L 范围内波动,平均值为 13 255 mg/L,VFA 与碱度比值为 0.12,预示着该项目厌氧发酵系统可接收更多原料<sup>[20]</sup>,进一步提高有机负荷,增加处理能力。该项目设计处理能力为 200 t/d,仍可根据厌氧系统的处理能力增加餐厨垃圾的收运量,扩大项目产能。

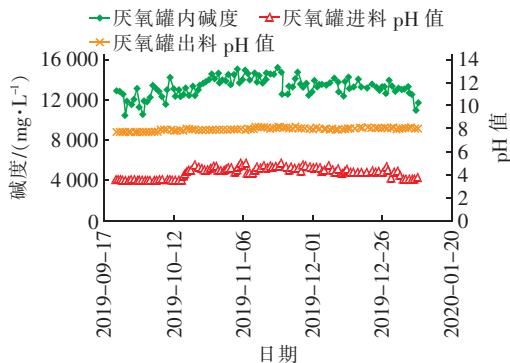


图8 厌氧罐内 pH 及碱度

Fig. 8 pH and alkalinity in anaerobic tank

### 3 高温过渡区厌氧发酵技术的优势

#### 3.1 提高厌氧转化效率

由西安市餐厨垃圾资源化利用和无害化处理项目(一期)厌氧系统运行数据可知,在同等有机负荷条件下,采用过渡区发酵技术发酵处理餐厨垃圾,其原料产气率及容积产气率均高于中温厌氧发酵。分析原因主要是在过渡区内中温菌群仍继续保持厌氧活性,在 37 ~ 45 °C 下甲酸甲烷杆菌、索氏甲烷丝菌等中高温厌氧菌群快速增殖,使中高温菌优势充分显现,高温菌群开始增长繁殖发挥作用,产甲烷菌的中温厌氧菌群与高温厌氧菌群实现了共存协同,即氢营养型产甲烷和乙酸营养型产甲烷两条途径同时存在<sup>[7]</sup>,提高了厌氧转化效率。

#### 3.2 降低预处理浆料降温能耗及氨抑制风险

由于餐厨垃圾预处理阶段提油后浆料的温度约为 65 °C,与传统中温(35 ~ 38 °C)厌氧发酵相比,采用中高温过渡区(43 ~ 45 °C)厌氧发酵可在预处理阶段节省 22% 的降温能耗;此外,由于餐厨垃圾的氮含量相对较高,与高温(50 ~ 55 °C)厌氧发酵相比,采用中高温过渡区厌氧发酵不易出现氨氮抑制问题。

### 4 结论与建议

由西安市餐厨垃圾资源化利用和无害化处理项目(一期)运行情况可看出,在中高温过渡区发酵温度下(43 ~ 45 °C),餐厨垃圾产气效率并没有出现明

显下降,其产气效率显著优于同类中温和高温研究报道。鉴于温度影响产甲烷相关微生物的代谢速率和底物供应,后续将针对不同温度条件下的产甲烷微生物的种群结构及代谢类型进行深入研究;对于大型厌氧沼气工程,可针对不同发酵原料的特性,选择经济合理的厌氧发酵温度,以达到最优处理效果和最低的运行成本。

### 参考文献:

- [1] 邹联沛,宋琳,李小伟,等. 湿垃圾组分对厌氧消化抑制作用的研究进展[J]. 化工进展,2020,39(增刊2):362-371.  
ZOU Lianpei, SONG Lin, LI Xiaowei, et al. Research progress of the inhibition of components of food waste on anaerobic digestion [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39 (Z2): 362 - 371 (in Chinese).
- [2] 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(4):39-43.  
BING Junyan, LUO Enhua, JIN Yiyang, et al. Current situation of food waste recycling in China [J]. Environmental Science and Management, 2018, 43 (4): 39 - 43 (in Chinese).
- [3] BROWNE J D. Biomethane Production from Food Waste and Organic Residues [D]. Cork: University College Cork, 2013.
- [4] LI L, HE Q, MA Y, et al. Dynamics of microbial community in a mesophilic anaerobic digester treating food waste: relationship between community structure and process stability [J]. Bioresource Technology, 2015, 189: 113 - 120.
- [5] 张永梅,王晓昌,程喆. 温度对餐厨垃圾自由厌氧发酵性能的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 1087-1092.  
ZHANG Yongmei, WANG Xiaochang, CHENG Zhe. Effect of temperature on digestion performance in a short-term free anaerobic fermentation from food waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (2): 1087 - 1092 (in Chinese).
- [6] AVERY G B, SHANNON R D, WHITE J R, et al. Controls on methane production in a tidal freshwater estuary and a peat land: methane production via acetate fermentation and CO<sub>2</sub> reduction [J]. Biogeochemistry, 2003(62):19-37.

- [7] MOHD N S, LI B, HAMEED A, *et al.* Anaerobic digestion at 45°C for sludge treatment: a trade-off between performances and capability in producing class a biosolids [J]. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2016, 37(6): 399–405.
- [8] 李美群. 薯类酒糟发酵制沼气的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.  
LI Meiqun. Studies on Potato Less of Methane Fermentation [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010 (in Chinese).
- [9] 维尔利环保科技集团股份有限公司. 一种提升中温和高温过渡区厌氧发酵效率的方法: 202011113273.9 [P]. 2021-01-29.  
WELLE Environmental Group Co. Ltd. A Method to Improve Anaerobic Fermentation Efficiency in Medium Temperature and High Temperature Transition Zone: 202011113273.9 [P]. 2021-01-29 (in Chinese).
- [10] 李月中, 宫亚斌, 谭婧, 等. 提升中温和高温过渡区厌氧发酵效率的试验研究及工程验证[J]. *中国沼气*, 2021, 39(2): 51–56.  
LI Yuezhong, GONG Yabin, TAN Jing, *et al.* Experimental study and engineering verification to improve the fermentation efficiency of mesophilic and thermophilic temperature intermediate zone [J]. *China Biogas*, 2021, 39(2): 51–56 (in Chinese).
- [11] 李靖, 李学尧. 接种比例对餐厨垃圾高固体浓度厌氧发酵的影响[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(11): 131–135.  
LI Jing, LI Xueyao. Effect of feed to inoculum ratios on high-solids anaerobic fermentation of food waste [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(11): 131–135 (in Chinese).
- [12] 梅冰, 谢影. 餐厨垃圾发酵产气潜力与特性[J]. *环境卫生工程*, 2016, 24(2): 42–43.  
MEI Bing, XIE Ying. Potential and characteristics of biogas production of food waste under anaerobic digestion [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2016, 24(2): 42–43 (in Chinese).
- [13] 韩艳霞, 师兆忠, 冯云, 等. 餐厨垃圾高温厌氧消化产沼气的试验研究[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(6): 14–17.  
HAN Yanxia, SHI Zhaozhong, FENG Yun, *et al.* Study on biogas yield from food waste by thermophilic anaerobic digestion [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, 37(6): 14–17 (in Chinese).
- [14] TANIMU M I, GHAZI T I M, HARUN M R, *et al.* Effect of feed loading on biogas methane production in batch mesophilic anaerobic digesters treating food waste [J]. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 2014, 5(1): 39–44.
- [15] 张存胜. 厌氧发酵技术处理餐厨垃圾产沼气的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.  
ZHANG Cunsheng. Biogas Production from Anaerobic Digestion of Food Waste [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013 (in Chinese).
- [16] 李政伟. 餐厨垃圾两相厌氧发酵中试研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.  
LI Zhengwei. Pilot Study on Two-phase Anaerobic Fermentation of Food Waste [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016 (in Chinese).
- [17] 李政伟, 尹小波, 李强, 等. 氨氮浓度对餐厨垃圾两相发酵中产甲烷相的影响[J]. *中国沼气*, 2016, 34(1): 46–49.  
LI Zhengwei, YIN Xiaobo, LI Qiang, *et al.* Effect of ammonia concentration on methanogenic phase in two-phase anaerobic digestion of kitchen waste [J]. *China Biogas*, 2016, 34(1): 46–49 (in Chinese).
- [18] 杜连柱, 杨继东, 张克强, 等. 厌氧消化过程氨抑制研究进展[J]. *可再生能源*, 2012, 30(4): 70–74.  
DU Lianzhu, YANG Jidong, ZHANG Keqiang, *et al.* A review on research of ammonia inhibition in anaerobic digestion [J]. *Renewable Energy Resources*, 2012, 30(4): 70–74 (in Chinese).
- [19] 陈智远, 宫亚斌, 詹偶如, 等. 高浓度高氨氮鸡粪沼气工程运行分析[J]. *中国沼气*, 2018, 36(3): 78–82.  
CHEN Zhiyuan, GONG Yabin, ZHAN Ouru, *et al.* Operation analysis of chicken manure biogas project with high concentration and high ammonia nitrogen [J]. *China Biogas*, 2018, 36(3): 78–82 (in Chinese).
- [20] ISSAH A A, TELESPORE K. Impact of volatile fatty acids to alkalinity ratio and volatile solids on biogas production under thermophilic conditions [J]. *Waste Management & Research*, 2020, 39(6): 1–8.

作者简介: 李月中 (1963 – ), 男, 江苏金坛人, 博士, 正高级工程师, 主要从事有机废弃物资源化利用方面的研究。

E-mail: liyuezhong@wellegroup.com

收稿日期: 2021-04-16

修回日期: 2021-04-29

(编辑: 衣春敏)