



文章栏目：专论

DOI 10.12030/j.cjee.201911085

中图分类号 X705

文献标识码 A

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(7): 1735-1742.

WANG Kaijun, WANG Jingyao, ZUO Jian'e, et al. Analysis and suggestion of current food waste anaerobic digestion technology in China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1735-1742.

# 我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状分析及建议

王凯军, 王婧瑶, 左剑恶, 吴静, 李坤\*

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

第一作者: 王凯军(1960—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 污(废)水处理等。E-mail: [wkj@tsinghua.edu.cn](mailto:wkj@tsinghua.edu.cn)

\*通信作者: 李坤(1986—), 女, 博士, 在站博士后。研究方向: 固体废弃物资源化。E-mail: [53772765xz@sina.com](mailto:53772765xz@sina.com)

**摘要** 随着我国餐厨垃圾排放量的持续增加, 已造成严重的环境污染防控压力。为促进我国餐厨垃圾的资源化利用和无害化处理处置, 在文献调研的基础上, 梳理了我国大中型餐厨沼气工程的发展现状, 分析了导致沼气产率低、沼气回用量大等餐厨沼气亟待解决的低经济效益难题的根本原因, 并结合实际情况提出餐厨垃圾厌氧消化技术相关的建议, 以期为我国提高餐厨垃圾的资源化、无害化处理能力和水平提供参考。

**关键词** 餐厨垃圾; 处理现状; 资源化; 厌氧消化; 建议

随着我国社会经济的快速发展和人民生活水平的提高, 餐厨垃圾产生量与日俱增, 已成为影响人居环境的重要污染源。餐厨垃圾是城市生活垃圾中有机固废的主要来源, 以淀粉、纤维素、蛋白质、脂肪等为主要成分, 具有营养丰富、易生物降解的特性。采用厌氧发酵技术处理餐厨垃圾, 既可解决环境污染问题, 产生的沼气又可制备生物燃气, 从而实现餐厨垃圾的资源化利用。餐厨垃圾的资源化属性使得单独收集、储存和利用成为未来处置此类垃圾的首要选择。但目前收运系统尚不完善, 餐厨垃圾与生活垃圾混合填埋处理的现象仍很普遍, 这不仅会引起二次污染, 而且也造成资源浪费严重, 不符合资源利用最大化的原则。本研究着重分析了具有发展前景的餐厨垃圾厌氧发酵技术, 为提高餐厨垃圾的资源化无害化处理及其推广应用提供新思路。

## 1 我国餐厨垃圾的特性

根据我国餐厨垃圾处理行业首部技术规范——《餐厨垃圾处理技术规范》(CJJ 18-2012)的定义, 餐厨垃圾分为餐饮垃圾和厨余垃圾, 其中, 餐饮垃圾指餐馆、食堂等的饮食剩余物, 果蔬、肉、油脂、面点等加工废弃物以及过期食品等; 厨余垃圾指家庭日常生活中丢弃的果蔬、瓜果皮及食物方面的下脚料、剩菜剩饭等易腐有机垃圾<sup>[1]</sup>。2019年12月1日开始实施的《生活垃圾分类标志》(GB/T 19095-2019)<sup>[2]</sup>规定, 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。家庭厨余垃圾表示居民家庭日常生活过程中产生的菜帮、菜叶、瓜果皮壳、剩菜剩饭、废弃食物等易腐垃圾, 简称厨余垃圾; 餐厨垃圾表示相关企业和公共机构在食品加工、饮食服务、单位供餐等活动中, 产生的食物残渣、食品加工废料和废弃食用油

收稿日期: 2019-11-15; 录用日期: 2020-04-16

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX07103-003, 2017ZX07103-001)

脂等；其他厨余垃圾表示农贸市场、农产品批发市场产生的蔬菜瓜果垃圾、腐肉、肉碎骨、水产品、畜禽内脏等，简称厨余垃圾。这一定义与《餐厨垃圾处理技术规范》(CJJ 18-2012)中的定义相比，差别较大，不仅范围扩大，而且更趋细致、规范。考虑到《生活垃圾分类标志》(GB/T 19095-2019)中的定义较新，而本研究引用的文献中的相关定义多参照(《餐厨垃圾处理技术规范》CJJ 18-2012)，为使定义具有一致性，本研究仍根据《餐厨垃圾处理技术规范》(CJJ 18-2012)中的定义进行讨论。餐饮垃圾与厨余的特性、处理工艺均有所不同。餐饮垃圾产量巨大，已成为我国餐厨垃圾的主要来源，以致在餐厨处理工程中，餐厨垃圾多指代餐饮垃圾<sup>[3]</sup>。因此，本研究中的餐厨垃圾主要指餐饮垃圾。餐厨垃圾成分复杂，食物类剩余物一般占75%~90%(基于湿基)，油脂占2%~17%，骨头占5.2%，竹木、废纸、塑料和金属等杂质共占2.6%<sup>[4]</sup>。受我国饮食习惯的影响，多使用食盐及烹炸方式提高食物风味。因此，我国餐厨垃圾除含水率高、有机质含量高外，多具有高盐分、高油脂的特点<sup>[5-6]</sup>。其化学组分主要为蛋白质、脂肪、食物纤维、淀粉等有机物，此外还含有多种无机盐和微量元素，养分丰富<sup>[7]</sup>。我国餐厨垃圾的理化特性<sup>[8-13]</sup>如下。1) 组成成分：含水率(湿基)73%~95%，盐分(湿基)0.5%~3%，碳水化合物(干基)55.2%~61.9%，蛋白质(干基)13%~27%，油脂(干基)4.6%~42%，纤维素(干基)2.6%~6.5%。2) 元素组成：餐厨垃圾的主要元素按比重由大到小顺序为C>O>H>N>Cl>S，餐厨垃圾的N元素可达3.86%，这是由于肉类及果蔬中蛋白质含量较高导致的，而较高的氯元素主要来源于无机盐。3) 微量元素：Ca(干基)0.07%~2.44%，Mg(干基)0.03%~0.16%，Fe、Ni、Mn含量(湿基)分别为3.17~766、0.19~2、0.96~110  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

由于餐厨垃圾水分含量高、易腐败，且易滋生细菌、病原菌及霉菌，因此，若不及时清理，会产生有毒有害物质及恶臭气味，对大气、水体、土壤造成污染并危害人体健康，严重的情况下还会导致蚊蝇滋生和各类疾病的传播。

## 2 我国餐厨垃圾产量

随着经济的快速发展和城市人口的增长，在过去30年，我国城市生活垃圾产生量增长迅速，由1980年的 $3.132\times 10^7$  t增长到2017年的 $2.15\times 10^8$  t，平均年增长率为5.34%<sup>[14]</sup>。预计到2030年，将增长到 $4.80\times 10^8$  t<sup>[15]</sup>。城市生活垃圾的产生和污染已成为影响环境保护、生态文明建设和可持续发展的重要因素。

餐厨垃圾是城市生活垃圾的重要组成部分，约占60.2%<sup>[16-18]</sup>。据统计<sup>[19]</sup>，2017年我国餐饮垃圾年产量达 $6.3\times 10^7$  t，加上厨余垃圾共约 $1.58\times 10^8$  t。目前，我国餐厨垃圾总产量高达 $2.10\times 10^8$   $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ，远高于欧盟国家( $8.9\times 10^7$   $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[20]</sup>)和美国( $3.8\times 10^7$   $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[21]</sup>)，约占全球餐厨垃圾总产量( $1.6\times 10^9$   $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[20]</sup>)的13.1%。随着经济和人口的增长，在2005—2025年，亚洲国家的餐厨垃圾产生量将持续增加，由 $2.78\times 10^8$  t增长到 $4.16\times 10^8$  t<sup>[22]</sup>。据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations)统计，到2025年，全球餐厨垃圾产生量将达 $2.2\times 10^9$  t<sup>[23]</sup>。

我国城镇化发展及人口增长刺激并促进了餐饮业的发展，许多大城市每天餐厨垃圾产生量在10 000 t以上。以2017年为例，北京餐厨垃圾日产生量约为20 822 t，上海为16 904 t<sup>[19]</sup>。我国城市地区每人餐厨垃圾日产生量约为0.55 kg<sup>[19]</sup>。餐馆及食堂等公共场所过度的食物浪费所造成的直接经济损失每年高达 $2\times 10^{11}$ 元<sup>[24]</sup>。据有效数据显示，我国餐厨垃圾处理能力严重不足，按“十三五”规划，预计2020年，回收利用和资源化处理的餐厨垃圾仅为 $5.59\times 10^4$   $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ ，不超过2017年日产生量的12.9%<sup>[4]</sup>。

## 3 我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状及主要技术难点

### 3.1 餐厨垃圾厌氧处理工艺

目前，常见的餐厨垃圾处理方式包括饲料化(6.4%)、堆肥(14.1%)和厌氧消化(76.1%)等<sup>[25]</sup>。

厌氧消化是在无氧环境下，多种专性及兼性厌氧菌降解有机质的过程，最后生成以甲烷为主要成分的混合气。其优点是能回收生物质能，无二次污染，缺点是沼液量大难处理，工程投资大，运营成本高。自2006年开始，厌氧发酵技术在欧洲和亚洲发达国家被广泛应用于餐厨垃圾处理<sup>[26]</sup>。2014年，欧洲有244个运行中的厌氧发酵罐，可处理城市有机固体废弃物 $7.75 \text{ Mt}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[27]</sup>。2016年，韩国厨余垃圾分类收集率达到94.2%，其中96%的源分捡厨余垃圾用来进行沼气发酵或做为畜禽饲料<sup>[28]</sup>。

餐厨垃圾是资源型固废，其处理方式应遵循可持续发展的原则。厌氧消化和好氧堆肥具有较好的资源回收属性，且能产生高附加值的产品，因此，其表现出较好的应用前景，目前已经在美国、欧洲等发达国家推广应用<sup>[29-31]</sup>。2018年，瑞典餐厨垃圾产生量的20%通过厌氧发酵和堆肥回收能源和营养物质<sup>[32]</sup>。近年来，我国政府陆续支持建设了一批餐厨垃圾处理处置工程，其工艺主要包括厌氧消化和好氧堆肥，并逐渐形成了以厌氧消化为主的工艺路线体系<sup>[33]</sup>。我国厌氧消化工艺类型较多，常见的工艺包括单相与两相技术、湿式与干式厌氧发酵技术等。

按物料的消化阶段可将厌氧消化工艺分为单相发酵与两相发酵。水解、产酸、产氢产乙酸和产甲烷4个阶段均在同一反应器中进行的厌氧发酵为单相发酵工艺。单相工艺具有设备结构简单、操作方便等优点，已在世界范围内广泛应用。但单相工艺不能使产酸菌和产甲烷菌同时处于最佳生长条件，以致体系稳定性差、产气率低。

两相厌氧技术实现了生物分相，减少了餐厨垃圾酸化对产甲烷菌的抑制作用，提高整个系统的处理效率，系统的抗冲击能力和稳定性也好于单相系统<sup>[34]</sup>。传统两相厌氧工艺采用空间上分离的2座反应器组合而成，具有占地面积大、热量利用率低的缺点。针对以上问题，济南十方餐厨处理厂设计并建造了池容 $5\,600 \text{ m}^3$ 的双环嵌套厌氧消化反应器，有机负荷(以TS计) $3.2 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ ，产气率达到 $95 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 餐厨垃圾。该项目在同一反应器内实现水解酸化和产甲烷两相分离，保证了产甲烷菌的最适生长环境，产气量是餐厨单相厌氧发酵的2.1倍，而且仅需配备一套保温系统，大大提高了系统热能利用率，为今后餐厨厌氧工艺的发展提供借鉴。

根据物料含固率，可将厌氧发酵分为湿式发酵( $<15\%$ )和干式发酵( $\geq 15\%$ )<sup>[35]</sup>。湿式发酵设备费用高、后续处理量大，但稳定性高。在欧洲，90%处理城市有机固体垃圾及生物质废弃物的沼气工程都采用单相厌氧发酵工艺，其中湿式与干式发酵工艺的应用大致平均分配<sup>[36]</sup>。我国目前多数商业化的沼气工程都采用湿式发酵工艺。苏州市某餐厨沼气工程采用湿热预处理和湿式厌氧发酵工艺，沼气产量达 $44.8 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ <sup>[37]</sup>。与湿式发酵相比，干式发酵具有产气效率高、耐冲击负荷能力高、沼液产生量少、占地面积小等优点。然而餐厨垃圾干发酵过程中的挥发性脂肪酸积累速度相对湿发酵更快，易导致干发酵过程的低效甚至运行失败，可通过改进工艺设备提高干发酵的反应效果。国外已形成多种成熟的有机垃圾干式厌氧发酵工艺设备。如瑞士的Kompogas工艺，采用塞流式反应器，可处理TS为15%~40%的高固有机垃圾，沼气产量达 $460 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}(\text{VS})$ <sup>[38]</sup>。针对含固率 $\geq 30\%$ 的餐厨垃圾等有机生活垃圾，北京首创环境投资有限公司研发出大型干式发酵厌氧反应器，采用连续进料推流，有机物转化率可达70%以上，已在宁波建成 $400 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 的厨余垃圾处理项目。

原料预处理是保持餐厨垃圾工程稳定高效运行的基础。餐厨垃圾主成分为可生物降解的有机质，但还有部分不可降解的成分，如塑料瓶、筷子、金属物等，这些杂质在后续的生化处理及生产设备运行中不仅会损坏后续设备，而且会降低有机物的分选效率，影响厌氧消化产沼气量<sup>[39]</sup>。因此，对餐厨垃圾进行有效的除杂预处理是保障工程稳定高效运行的基础。传统分选工艺采用滚筒筛分技术先将大件垃圾去除，再用破碎分选技术将小件和韧性非营养物质等分离，但程序较繁琐、效率低、分离效果不理想。针对传统餐厨垃圾预处理中的能耗高、有机物损失多等问题，近些年开展了大量研究，取得了较好的成果。北京京城环保股份有限公司研发出一种集分选、破



碎、制浆为一体的新型餐厨预处理设备, 杂质去除率高达90%<sup>[40]</sup>。中环保研发出基于水力分离的预处理工艺设备。该技术通过水体的搅动、剪切及垃圾组分间的摩擦作用使有机质变成均浆, 有效提高了有机质回收率和浆液的品质。除杂率高达95%以上, 有机质损失率<8%。此外, 常州的维尔利公司针对含无机杂质较多的餐厨垃圾开发出分选破碎一体机+淋滤水解工艺, 实现了低成本回收有机质<sup>[41]</sup>。普拉克公司推出的粗分选+自动分选制浆一体机可在制浆的同时去除餐厨垃圾中的杂质, 适用大多数餐厨垃圾物料的处理<sup>[41]</sup>。

### 3.2 餐厨垃圾沼气工程建设现状及厌氧处理难题

近年来, 我国生物沼气得到了快速发展, 到2015年底, 共建成各类沼气工程110 975处, 其中, 中小型沼气工程103 898处, 大型沼气工程6 737处, 特大型沼气工程34处, 工业废弃物沼气工程306处, 年产沼气 $2.225 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[42]</sup>。所建沼气工程中户用沼气的生物质来源主要集中在农业秸秆废弃物, 而规模化沼气工程的生物质来源主要集中在畜禽粪便、工业废水废物以及城市生活有机固废和有机污泥<sup>[43]</sup>。相应的沼气潜能较大的城市垃圾有机质在2010年以前一直被人们所忽视。据中国城市环境卫生协会的资料透露, 全国共有657个设市城市, 餐厨垃圾日均产量超过50 t的城市有512个<sup>[44]</sup>, 但我国餐厨垃圾无害化处理资源化利用起步晚, 当时已建成的餐厨垃圾处理的工程实例较少。

随着一系列餐厨垃圾管理的相关政策法规的颁布执行, 以及城市餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点的开展, 大大推进了我国餐厨垃圾沼气工程的建设。目前国内餐厨沼气工程多采用中温连续搅拌(continuously-stirred tank reactors, CSTR)湿式厌氧消化工艺。2016年投入运行的杭州餐厨垃圾处理一期工程以“自动分选+三相提油+高效厌氧”为主要工艺路线, 项目采用耐冲击负荷和高固体浓度的利浦罐结构CSTR厌氧反应器, 容积为4 000 m<sup>3</sup>, 处理餐厨垃圾200 t·d<sup>-1</sup>, 产沼气13 000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>, 发电26 000 kWh·d<sup>-1</sup>, 毛油产量为5.3 t·d<sup>-1</sup><sup>[45]</sup>。2017年, 在东南沿海某市建成的餐厨沼气工程采用“CSTR厌氧消化+膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)污水处理”工艺, 处理量为205 t·d<sup>-1</sup>, 餐厨垃圾产沼气率达到80 m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup>, 80%沼气用于发电上网<sup>[46]</sup>。

与此同时, 干法工艺因其具有较高的耐冲击负荷能力, 以及产气效率高等优点, 在国内的应用逐渐增多。山东某市建立了第一座采用中温干法厌氧发酵工艺处理餐厨垃圾的沼气工程, 日处理量150 t, 污水处理系统采用“MBR+纳滤膜(nanofiltration, NF)+反渗透(reverse osmosis, RO)”工艺处理沼液和其他生活污水<sup>[47]</sup>。此外, 餐厨垃圾经提油和饲料加工等处理会产生大量有机废水。针对该类高浓度有机废水, 2009年, 宁波采用升流式厌氧污泥床技术建成2 000 m<sup>3</sup>沼气工程, 年产沼气 $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 可发电 $4.5 \times 10^6 \text{ kWh}$ <sup>[48]</sup>。

对于单一的餐厨垃圾, 外国多采用湿式发酵工艺, 对于混合垃圾分选后的有机垃圾多采用干式发酵工艺<sup>[49]</sup>。而针对餐厨厌氧发酵易酸化的特性, 韩国、德国、法国多通过餐厨与城市生活垃圾、农业废弃物等混合发酵促进营养平衡、提高产气量。以德国为例, 共有38个处理餐厨垃圾的沼气工程, 其中采用混合厌氧发酵工艺的沼气工程约占87%, 在标准状况下, 沼气产量达104 m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup><sup>[33]</sup>。

截至2015年, 国家发改委共确立了100个餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点城市, 覆盖了全国32个省级行政区。据不完全统计, 全国已建和筹建的餐厨垃圾处理项目(50 t·d<sup>-1</sup>以上)达118座以上<sup>[31]</sup>。试点项目的开展为今后餐厨垃圾资源化处理提供了宝贵的经验, 但同时也存在很多问题, 以致某些工程项目无法运转下去, 甚至部分试点城市放弃了试点资格<sup>[50]</sup>。“十二五全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划”和“十三五全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划”都对餐厨垃圾处理项目做了规划, 但也没能完全如期完成<sup>[33]</sup>。这可能是由于我国餐厨垃圾规模化处理技术的研究仍处于起步阶段, 成功经验不足, 常出现缺乏先进技术、经济效益低、依赖政府补贴等问题<sup>[33, 37]</sup>。其中, 沼气产量低、循环回用量高等导致的低经济效益问题严重制约着餐厨垃圾处理

的市场化发展，以致政府补贴到位后，沼气工程项目常缺乏运转的动力。因此，发展先进的餐厨垃圾规模化厌氧发酵技术是解决以上问题的重要出路。从技术层面来看，餐厨垃圾厌氧发酵技术存在以下3点问题：1) 饮食文化造成餐厨成分复杂，以无害化、减量化为出发点的传统厌氧工艺路线以及国外引进技术无法适应餐厨垃圾特性，资源化不足，导致成本高而产气率低；2) 餐厨垃圾的有机质含量较高且极易水解酸化，以致在餐厨垃圾单相沼气工程实际运行过程中为了使系统维持稳定，常采用较低的有机负荷率，从而增加了运行成本，经济效益较差；3) 餐厨垃圾处理过程包括油脂提取、厌氧消化、物料干化以及发电和供热等环节都需要消耗前端产生的沼气，造成工艺系统生物燃气净产出偏低，经济效益低。

#### 4 餐厨垃圾处理与回收利用的建议

随着我国能源结构中天然气应用比例的提高，国内天然气供需缺口会逐年放大。厌氧消化制备生物燃气不仅能够实现“变废为宝”，而且可以补充天然气缺口，实现节能减排。因此，该技术已成为生物质废物处理处置的优选技术。但是受限于发展时间过短，餐厨垃圾资源化利用水平有待提高。针对目前该领域存在的关键技术问题提出以下建议。

1) 依据餐厨垃圾地域特征调整厌氧处理工艺设备。我国餐厨垃圾地域间差异较大，应根据各地区餐厨垃圾的理化特性，适当调整餐厨垃圾处理工艺。此外，餐厨垃圾的预处理设备等的选型也应考虑不同地区餐厨垃圾的特征，以保障餐厨厌氧消化的高效稳定运行<sup>[50-51]</sup>。

2) 开展厌氧+好氧组合工艺研究，提高甲烷产量及资源化利用率。厌氧发酵通过降解生物质废弃物产生能源气体。好氧堆肥可利用微生物分解有机废弃物，经腐熟转化为腐殖酸类有机肥。在餐厨垃圾单相沼气工程中，分别采用厌氧发酵与好氧堆肥技术处理餐厨浆液固液分离后的液相和固相，不仅提高餐厨垃圾厌氧发酵系统的稳定性，而且产生高附加值的有机肥产品，增加了收益。此外，好氧预处理还可加速餐厨垃圾水解、快速启动厌氧反应，提高产气量。

3) 餐厨垃圾中轻物质的资源化利用。原生餐厨垃圾中约含有20%~30%的塑料、木材、纸张等轻物质，这部分轻物质可生化性极差，厌氧消化前需进行分离。常采用焚烧或卫生填埋的方式进行处理，但存在二次污染、成本高、资源浪费等问题，不具可持续发展性。建议采用具有能量回收率高、环境效益好和产物利用价值高等优点的两段热解<sup>[52]</sup>技术对餐厨垃圾轻物质进行资源化处理，制备高品质富氢合成气，消除生物油后续利用难题，提高轻物质资源化利用率。合成气可供餐厨厌氧消化反应器，利用合成气中高含量 $H_2$ 将合成气本身携带的 $CO$ 、 $CO_2$ 以及沼气中的 $CO_2$ 全部还原成 $CH_4$ ，同步实现合成气利用、甲烷增量和沼气提纯三重功能。餐厨厌氧处理系统中热电联产产生的热量以及提油单元的废热等余热都可用于轻物质的干化、加热和热解。同时，也可考虑回用部分产物(生物油和合成气)来满足热解和厌氧系统对能量需求，从而减少沼气的回用。

#### 5 结语

以资源化为导向的餐厨垃圾厌氧处理技术，能有效实现餐厨治理的“资源化、减量化、无害化”原则。但我国餐厨垃圾规模化厌氧处理仍处于起步阶段，应从限制餐厨垃圾厌氧处理资源化利用技术路线推广应用的关键问题着手，加快研发高效厌氧消化工艺，以提高餐厨垃圾的资源化利用效率，真正达到解决餐厨垃圾污染的目的。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国行业标准餐厨垃圾处理技术规范: CJJ 184-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

- [2] 中国国家标准化管理委员会. 生活垃圾分类标志: GB/T 19095-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [3] 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.
- [4] ZHOU Y, ENGLER N, NELLES M. Symbiotic relationship between hydrothermal carbonization technology and anaerobic digestion for food waste in China[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260: 404-412.
- [5] HE M, SUN Y, ZOU D, et al. Influence of temperature on hydrolysis acidification of food waste[C]//Tsinghua University, Basel Convention Coordinating Centre for Asia and the Pacific (BCRC China), National Center of Solid Waste Management of Ministry of Environmental Protection of China, and Solid Waste Branch of Chinese Society for Environmental Sciences. Seventh International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT 7), 2012: 85-94.
- [6] ZHANG F, WU Q. Functional materials development from kitchen waste[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 16(3): 70-74.
- [7] WEI Q Y, ZHANG W Q, GUO J B, et al. Performance and kinetic evaluation of a semi-continuously fed anaerobic digester treating food waste: Effect of trace elements on the digester recovery and stability[J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 477-485.
- [8] ZHOU H, MENG A H, LONG Y Q, et al. An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value[J]. *ChemInform*, 2015, 46(30): 107-122.
- [9] 姚猛. 牛粪和厨余垃圾混合厌氧消化实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [10] ZHANG L, LEE Y W, JAHNG D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(8): 5048-5059.
- [11] ZHANG C S, SU H J, TAN T W. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 145: 10-16.
- [12] ZHANG R H, EL-MASHAD H M, HARTMAN K, et al. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(4): 929-935.
- [13] LI R P, GE Y J, WANG K S, et al. Characteristics and anaerobic digestion performances of kitchen wastes[J]. *Renewable Energy Resources*, 2010, 28(1): 76-80.
- [14] 许博, 赵月, 鞠美庭, 等. 中国城市生活垃圾产生量的区域差异: 基于STIRPAT模型[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(11): 4901-4909.
- [15] XU Q Y, GE J J. Reduction of CO<sub>2</sub> emission using bioreactor technology for waste management in China[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 1026-1031.
- [16] GU B X, JIANG S Q, WANG H K, et al. Characterization, quantification and management of China's municipal solid waste in spatiotemporal distributions: A review[J]. *Waste Management*, 2016, 61: 67-77.
- [17] ZHANG D Q, TAN S K, GERSBERG R M. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(8): 1623-1633.
- [18] WEI Y M, LI J Y, SHI D Z, et al. Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122: 51-65.
- [19] 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.
- [20] INGRAO C, FACCILONGO N, DI G L, et al. Food waste recovery into energy in a circular economy perspective: A comprehensive review of aspects related to plant operation and environmental assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*,

- 2018, 184: 869-892.
- [21] XU F Q, LI Y Y, GE X M, et al. Anaerobic digestion of food waste-challenges and opportunities[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 1047-1058.
- [22] MEHMET M, CAROL S K, COLIN W. Analysing global food waste problem: pinpointing the facts and estimating the energy content[J]. *Central European Journal of Engineering*, 2013, 3(2): 157-164.
- [23] MEHARIYA S, PATEL A K, OBULISAMY P K, et al. Co-digestion of food waste and sewage sludge for methane production: Current status and perspective[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 519-531.
- [24] CHEN T, Jin Y Y, SHEN D S. A safety analysis of food waste-derived animal feeds from three typical conversion techniques in China[J]. *Waste Management*, 2015, 45: 42-50.
- [25] 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(1): 1-8.
- [26] THI N B D, KUMAR G, LIN C Y. An overview of food waste management in developing countries: Current status and future perspective[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 157: 220-229.
- [27] LOTTI T, BURZI O, SCAGLIONE D, et al. Two-stage granular sludge partial nitrification/anammox process for the treatment of digestate from the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste[J]. *Waste Management*, 2019, 100: 36-44.
- [28] SEOKHWAN H. Food waste management in KOREA: Anaerobic digestion (Lab to field to lab)[R]. 清华大学学术讲座, 北京, 2018.
- [29] BERNSTAD A, JANSEN J L. Review of comparative LCAs of food waste management systems: Current status and potential improvements[J]. *Waste Management*, 2012, 32(12): 2439-2455.
- [30] LIN C S, PFALTZGRAFF L A, HERRERO D L. Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(2): 426-464.
- [31] 毕珠洁, 邵俊, 许碧君. 中国餐厨垃圾管理现状研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(S1): 765-768.
- [32] CARLSSON M, DAVID H, BOHN L, et al. Impact of physical pre-treatment of source-sorted organic fraction of municipal solid waste on greenhouse-gas emissions and the economy in a Swedish anaerobic digestion system[J]. *Waste Management*, 2015, 38: 117-125.
- [33] DE C D, WEN Z, GOTTFRIED O, et al. A review of global strategies promoting the conversion of food waste to bioenergy via anaerobic digestion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 204-221.
- [34] 凡广生, 李多松. 两相厌氧消化工艺的研究进展及其应用[J]. *水科学与工程*, 2006(2): 11-13.
- [35] LI K, LIU R H, SUN C. A review of methane production from agricultural residues in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 857-865.
- [36] LISSENS G, VANDEVIVERE P, DE B, et al. Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(8): 91-102.
- [37] JIN Y Y, CHEN T, CHEN X, et al. Life-cycle assessment of energy consumption and environmental impact of an integrated food waste-based biogas plant[J]. *Applied Energy*, 2015, 151: 227-236.
- [38] WELLINGER A, WYDER K, METZLER A E. A new system for the anaerobic treatment of source separated waste[J]. *Water Science and Technology*, 1993, 27(2): 153-158.
- [39] 曹辉, 浦鹏, 蒋弟勇, 等. 三种预处理方式对餐厨垃圾液相厌氧发酵的影响[J]. *绿色科技*, 2017(12): 1-3.



- [40] 刘悦, 巴智勇, 刘景祎, 等. 新型餐厨垃圾预处理设备的设计开发研究[J]. 现代化工, 2017(12): 164-166.
- [41] 邹锦林. 餐厨垃圾厌氧消化预处理工艺研究[J]. 自动化应用, 2017(7): 59-63.
- [42] 国家发展和改革委员会, 农业部. 全国农村沼气发展“十三五”规划[A]. 北京, 2017.
- [43] 董仁杰, 刘广青, 侯允, 等. 中国沼气利用现状[C]//中国农业工程学会畜牧工程分会. 2000全国畜牧工程学术研讨会, 2001: 1-6.
- [44] WEN Z, WANG Y, DE C D. Performance evaluation model of a pilot food waste collection system in Suzhou City, China[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 201-207.
- [45] 宫亚斌, 陈智远, 姚建刚, 等. 200 t/d餐厨垃圾厌氧产沼工程调试与运行分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(10): 1443-1447.
- [46] 庄渊. 高效预处理+厌氧消化工艺处理餐厨垃圾工程实例[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(11): 90-92.
- [47] 范晓晨, 刘德涛, 邵田羽. 某餐厨垃圾处理项目工艺流程介绍[J]. 中国建筑金属结构, 2017(7): 45-48.
- [48] 沈炳国, 黄安娜, 王能杰, 等. 宁波大型餐厨垃圾厌氧发酵装置简介[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 34-36.
- [49] 熊婷, 霍文冕, 窦立宝, 等. 城市餐厨垃圾资源化处理必要性研究[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(2): 148-152.
- [50] 李骞. 餐饮垃圾处理技术现状和问题初析[C]//中国环境科学学会. 2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷), 2019: 1123-1129.
- [51] 刘刚. 餐厨垃圾的高负荷厌氧消化稳定工艺及动力学研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [52] 常凤民, 王启宝, GIWA S A, 等. 城市污泥两段式催化热解制合成气研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 804-810.

(本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

## Analysis and suggestion of current food waste anaerobic digestion technology in China

WANG Kaijun, WANG Jingyao, ZUO Jian'e, WU Jing, LI Kun\*

State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

\*Corresponding author, E-mail: 53772765xz@sina.com

**Abstract** The discharge of food waste continuously increased in our country, causing serious environmental pollution prevention and control pressure. Resource utilization and harmless treatment are the main development directions of food waste disposal. Based on literatures review, this paper summarizes the development status of large- and medium-sized biogas projects treating food waste, analyzes the underlying reasons for the urgent low economic benefits problem caused by low biogas productivity and too large amount of biogas for reuse, and puts forward the rationalization suggestions on food waste anaerobic digestion technology, providing reference for the capacity and level improvement of resource recovery and harmless treatment of food waste in China.

**Keywords** food waste; treatment status; resource recovery; anaerobic digestion; suggestion