

餐厨垃圾单组分厌氧发酵产甲烷研究进展*

1.福建师范大学环境科学与工程学院 2.福建师范大学环境科学研究所

张鹏帅^{1,2} 林志龙^{1,2} 王晓洁^{1,2} 孙启元^{1,2} 郑育毅^{1,2} 刘常青^{1,2}

[摘要] 由于餐厨垃圾中丰富的有机物、较好的可生化性,使得厌氧发酵成为目前处理餐厨垃圾最为有效的一种方式。但餐厨垃圾组分复杂,性质多变,不同的饮食结构也使得餐厨垃圾的性质不尽相同。研究餐厨垃圾代表性组分有助于探究不同组分餐厨垃圾厌氧发酵机理,真正实现资源最大化利用。

[关键词] 餐厨垃圾 代表性组分 厌氧发酵 研究进展

我国餐厨垃圾处置形势较为严峻,目前的主要处置方式包括填埋、焚烧、堆肥、制作饲料以及厌氧发酵等^[1-2]。其中,厌氧发酵处理餐厨垃圾不仅稳定化、无害化程度较高,还可产生氢气、甲烷等高热值清洁能源气体,是目前最为理想的一种处置方式。国内外对于餐厨垃圾厌氧发酵的研究也较多,但由于餐厨垃圾成分复杂,性质多变,每个地区饮食结构不同,导致餐厨垃圾的性质不同,从而对于众多相似的研究,其结果往往不尽相同。因此近年来,学界开始对餐厨垃圾代表性组分厌氧发酵进行研究,本文以餐厨垃圾不同组分所具有的不同厌氧发酵特点入手,综合国内外研究进展,分析当前研究状况,探索发展方向,以期对相关研究提供参考。

1 餐厨垃圾不同组分厌氧发酵特性研究进展

餐厨垃圾单组分根据其化学组成可分为淀粉类餐厨组分、蛋白类餐厨组分、纤维素类餐厨组分,以及油组分。不同组分具有不同的厌氧发酵特性。

1.1 淀粉类餐厨组分发酵

淀粉类餐厨组分结构较为简单,在水解阶段易被淀粉酶水解为糖类。糖类被厌氧微生物利用的速率较快,因此淀粉类餐厨组分厌氧发酵耗时较短。Cho 等^[3]研究了不同餐厨组份在 37 °C 下的产甲烷性能,得出熟大米的产甲烷量可达 294mL/gVS。浦跃武^[4]研究了接种率对木薯渣厌氧发酵特性的影响。研究表明,接种率为 70%时,木薯渣发酵过程较为稳定,体系未出现酸积累。厌氧发酵的产甲烷量可达 249.35mL/gVS,甲烷含量可达 48.16%。Parawira 等^[5]分别研究了土豆单独厌氧发酵以及联合甜菜叶厌氧发酵的性能。结果表明,土豆单独厌氧发酵,在含固率为 40%时,产甲烷量达到最大,为 0.32L/gVS,添加甜菜叶后,土豆的产甲烷量

可提高 31%~62%。其中添加甜菜叶的主要功能是调节发酵系统的 C/N 比,防止酸化。

1.2 肉类餐厨组分厌氧发酵

肉类餐厨组分的主要化学组成为蛋白质,其厌氧发酵产气量大,且甲烷浓度较高。Wu 等^[6]研究了含固率对猪肉和骨头粉末混合物厌氧发酵的影响。研究表明,含固率对其厌氧发酵产甲烷量无太大影响,而含固率对延滞时间的影响较大。在 5%及 10%的含固率下,体系厌氧发酵延滞时间最长。这是因为,在 5%及 10% 含固率下厌氧发酵,体系积累了较多的挥发酸和游离氨。Eiroa 等^[7]测定了鱼罐头厂不同种鱼类废物的产甲烷量,结果得出金枪鱼与沙丁鱼厌氧发酵产甲烷量相近,为 0.47gCOD-CH₄/g COD_{added},而鲭鱼废物的甲烷产量则可达 0.59gCOD-CH₄/g COD_{added}。研究还发现,过高的基质种泥比会导致酸积累,影响体系的发酵性能。Ana 等^[8]研究了餐厨垃圾中不同单组分的厌氧发酵性能,得出结论:猪肉鱼肉虽然在实验模拟餐厨垃圾中占比较小,但是贡献了较多的产甲烷量,每 gVS 产甲烷量可达 291mL。

1.3 纤维素类餐厨组分厌氧发酵

蔬果类餐厨主要化学成分为纤维素和糖类。糖类能迅速被微生物分解利用,而纤维素则需要耗费较长的时间才能被分解。Gunaseelan 等^[9]研究了多种水果和蔬菜的厌氧消化产甲烷量,结果表明,实验所用水果的产甲烷量在 0.18~0.723L/g VS,蔬菜的产甲烷量在 0.19~0.41L/gVS。吉喜燕等^[10]以菜市场废弃大白菜为研究对象,研究其在 30°C 下厌氧发酵的发酵性能,并将研究结果与其他研究作了对比。研究结果表明,废弃大白菜的产甲烷量要大于其他同类型底物。高春燕等^[11]以海带为研究对象,研究了温度、盐度、pH 对海带产甲烷量的影响,并根据实验结果对海带厌氧发酵的条件

* 基金项目:福建省科技厅重大专项(2014YZ0002-1);福建省科技计划项目(2015R0099);福建省自然科学基金项目(2015J01187,2016J05115,2016J05096)。通讯作者:刘常青。

进行优化。在优化后的条件下进行厌氧发酵，海带产气量可以提高 17.3%。

餐厨垃圾中的蔬果成分应为蔬果边角料，因此一部分研究以蔬果边角料为研究对象，探讨其厌氧发酵性能。张艳^[12]以娃娃菜废弃物为原料，通过小试试验与中试试验，研究了接种物浓度、碳氮比、酸化前处理等因素对厌氧发酵的影响。研究表明，接种物浓度为 30%，C/N 比为 20:1 的实验组沼气产量和甲烷含量高于其他实验组。研究还发现，经酸化处理后可以提高体系产气量和甲烷含量。刘芳等^[13]研究了菜花、甘蓝、白菜、西红柿废弃叶单独厌氧发酵以及和牛粪联合厌氧发酵的产气特性。结果表明，以上四种熟菜废弃物单独厌氧发酵累计产气量可分别达到 16121, 18709, 17226 及 19701mL。在单独厌氧发酵实验中，西红柿废弃叶厌氧发酵过程甲烷含量最高，可达 54%。研究还表明，蔬菜废弃茎叶与牛粪协同发酵可以提高其产气周期，累计产气量及甲烷体积分数。

1.4 油及高脂物质

油脂以及含油废物中有机质含量较高，厌氧发酵产气量较大。李凇等^[14]研究了接种比和 C/N 比对废弃油脂甲烷产量的影响。研究表明，中温厌氧发酵下，油脂在 1:6 的接种比例下产甲烷量达到最大，为 737mL/gTS。在设定的四种 C/N 比值下，C/N 比越小，油脂产甲烷量最大。贺静^[15]等以废弃油脂为对象，研究了菌种驯化对废弃油脂厌氧发酵的影响。研究发现，驯化后的菌种能够提高油脂厌氧发酵的效果，在驯化菌种的作用下，油脂的产甲烷量可达 1.21L/g。

油脂经过酶预处理后，产甲烷量可得到大幅提升。Ying 等^[16]利用三种脂肪酶对餐厨浮油、动物油、植物油进行预处理，研究发现油通过来自曲霉及念珠菌的脂肪酶在 40 ~ 50 下水解 24h 后，长链脂肪的释放效果最好。经处理后，动物油、植物油以及餐厨浮油的产甲烷量可分别提高 80.8%~157.7%，26.9%~53.8%，以及 37.0%~40.7%。

油脂由于有机质丰富，常被添加至其他有机质较为贫乏的物料中进行协同发酵。Wan 等^[17]研究了浓缩池污泥与油脂协同发酵的性能。当油脂添加量为 64%时，体系日甲烷产量提高了 37%，沼气中的甲烷含量提高至 66.8%。Wang 等^[18]用隔油栅垃圾与浓缩池污泥进行协同发酵，体系产甲烷量可达 0.752m³/kg(VS)，甲烷含量提升至 70.1%。Luostarinen 等^[19]研究了市政污泥与猪肉厂含脂污泥协同消化的效果。研究表明，市政污泥在添加 46%的含脂污泥后，体系厌氧发酵启动迅速，产气量随着含脂污泥添加量的增加而增加。

由于油脂能够吸附在细胞膜表面，阻碍细胞与外界的物质传递，因此，油脂在厌氧发酵过程中常发生抑制现象。解除抑制可极大提高油脂的厌氧发酵效果。Wu 等^[20]对比了四

种处理方式对已发生抑制的发酵系统的恢复效果。研究发现，添加接种物对系统的恢复效果最好，并且接种物添加量越多，恢复时间越短。

2 结论与展望

通过餐厨垃圾四种代表性组分厌氧发酵特性研究现状进行全面论述与分析后，可得出以下结论：

(1) 当前餐厨垃圾厌氧发酵单组分研究主要包括淀粉类、蛋白类、纤维素类以及油脂类，四者相比，淀粉类因其结构简单，厌氧发酵耗时最短；纤维素类较难被微生物分解，厌氧发酵耗时时间最长；较高的含固率对肉类餐厨组分厌氧发酵延滞时间产生较大影响。

(2) 产气方面，油及高脂物质中有机质最丰富，产甲烷量最大，甲烷浓度较高，其次是肉类，淀粉类最少。通过驯化菌株，结合其他有机废弃物进行联合厌氧发酵等方法可增大产气量，提高甲烷浓度。

(3) 以上四种组分在发酵过程中均会出现不同程度的酸抑制现象，油脂因较强的吸附能力，酸抑制现象最为明显，向体系添加不同的接种物可改善体系 C/N 比，有效缓解酸抑制现象。

目前国内对餐厨垃圾单组分厌氧发酵研究较少，将各种代表性组分餐厨垃圾按不同配比探究厌氧发酵性能并确定水解酸化限制因子从根本上解决体系酸化问题尚待研究，参考国外饮食结构及研究状况，针对不同组分选取合适的预处理方式，有助于解决我国因各地饮食方式差异导致餐厨垃圾组分不同，而使餐厨垃圾最大资源利用化较难的问题。

参考文献:

- [1] 魏世锋. 我国餐厨垃圾处理技术浅析[C]//沼气发展战略和对策研讨会. 沈阳, 2010: 3.
- [2] 孙媛媛, 许鹏, 刘丽清. 餐厨垃圾资源化技术研究探析[J]. 环境科学与管理, 2014(2): 174-177.
- [3] Cho J K, Park S C, Chang H N. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes [J]. Fuel & Energy Abstracts, 1995, 36(3): 245-53.
- [4] 浦跃武, 刘坚. 木薯渣厌氧发酵制取沼气的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(29): 14308-14310.
- [5] Parawira W, Murto M, Zvauya R, et al. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves[J]. Renewable Energy, 2004, 29(11): 1811-1823.
- [6] Wu G, Healy M G, Zhan X. Effect of the solid content on anaerobic digestion of meat and bone meal[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(19): 4326-4331.

(下转第 22 页)

是为了保障辐射强度满足消毒要求，定期对紫外灯管面的污垢膜进行清洗。

2.5 污泥脱水及污泥处理监管

以泥饼含水率指标对污泥脱水情况进行考核，泥饼含水率应低于 80%。为了保障污泥浓缩与脱水效果，应合理控制絮凝剂的配制浓度，根据经验，絮凝剂配制浓度一般控制为 0.25%~0.45%，同时应定期对絮凝剂浓度进行标定。

为加强污泥处置的监督管理，建立污泥处理管理台账，污泥转运执行三联单制度，并增加道路监控，减少运输环节的污染。

3 结论

综合上述监管措施经验，基于污水处理工艺流程，以反应池为核心，以污水处理效果为目标导向，构建污水处理运行监督管理体系，示意图见图 2。

通过建立健全污水处理运行监管体系，有效提升了荔城污水处理厂运行管理水平，对改善当地水环境质量起到较好的作用。

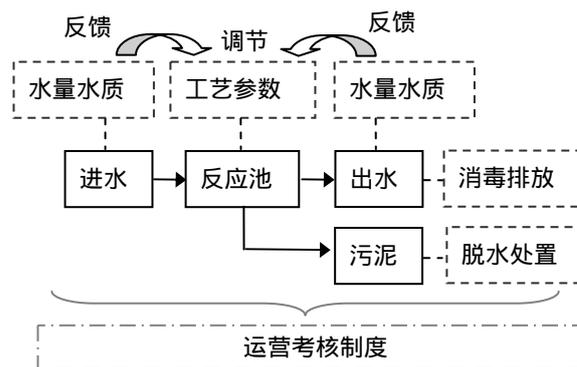


图 2 污水处理监管体系示意图

参考文献：

- [1] 张春萍. 北京城镇污水处理厂运行监管措施研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [2] 邱忠莉. 小城镇污水处理厂运行绩效评价方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [3] 环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准[S], 2002.

(上接第 9 页)

- [7] Eiroa M, Costa J C, Alves M M, *et al.* Evaluation of the biomethane potential of solid fish waste[J]. *Waste Management*, 2012, 32(7): 1347-1352.
- [8] Nielfa A, Cano R, Vinot M, *et al.* Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste[J]. *Process Safety & Environmental Protection*, 2015, 94: 180-187.
- [9] Gunaseelan V N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2004, 26(4): 389-399.
- [10] 吉喜燕, 肖志海, 林卫东, 等. 废弃大白菜厌氧消化产甲烷的实验研究[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(3): 10-13.
- [11] 高春燕, 刘慧, 张婷婷. 海带发酵产甲烷的初步研究[J]. *可再生能源*, 2013, 31(10): 109-114.
- [12] 张艳, 汪建旭, 冯炜弘, 等. 娃娃菜废弃物厌氧发酵制取沼气的小试和中试[J]. *中国沼气*, 2015, 33(5): 54-59.
- [13] 刘芳, 邱凌, 李自林, 等. 蔬菜废弃物厌氧发酵产气特性[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(10): 162-170.
- [14] 李凇, 张云飞, 李强, 等. 废弃食用油脂中温厌氧发酵特性研究[J]. *中国沼气*, 2016, 34(5): 27-31.

- [15] 贺静, 陈泾涛, 李强, 等. 菌种驯化对废弃食用油脂中温厌氧消化的影响[J]. *中国沼气*, 2015, 33(4): 26-30.
- [16] Ying M, Luan F, Yuan H, *et al.* Enhancing anaerobic digestion performance of crude lipid in food waste by enzymatic pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 48-55.
- [17] Wan C, Zhou Q, Fu G, *et al.* Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease[J]. *Waste Management*, 2011, 31(8): 1752-1758.
- [18] Wang L, Aziz T N. Determining the limits of anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge with grease interceptor waste[J]. *Water Research*, 2013, 47(11): 3835-3844.
- [19] Luostarinen S, Luste S, Sillanpää M. Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(1): 79-85.
- [20] Wu L J, Kobayashi T, Kuramochi H, *et al.* Recovery strategies of inhibition for mesophilic anaerobic sludge treating the de-oiled grease trap waste[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, 104: 315-323.