

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.019

# 颗粒活性炭强化餐厨垃圾中食用油厌氧消化产甲烷

许跃<sup>1</sup>, 廖欢<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 陆海军<sup>1</sup>, 魏娜<sup>1</sup>, 贺杏华<sup>1</sup>,  
张荣堂<sup>1</sup>, 杨开<sup>2</sup>, 王弘宇<sup>2</sup>

(1. 武汉轻工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430023; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 通过投加颗粒活性炭(GAC)强化直接种间电子传递(DIET),进而提升餐厨垃圾中常见食用油的厌氧消化产甲烷效能,并分析投加GAC对微生物群落结构的影响。研究发现,与未投加GAC的对照组相比较,投加GAC的实验组可以高效稳定地进行厌氧消化产甲烷。在菜籽油厌氧消化过程中,对照组的乙酸浓度在第7天达到最大值(7 mmol/L),之后基本保持不变。而在投加GAC的实验组中,乙酸浓度在第7天达到最大值(3.9 mmol/L),之后逐渐降低,到第13天基本为0。与此同时,实验组的最大甲烷产量约为对照组的3.5倍。因而,投加GAC促进了乙酸的降解和甲烷的转化。对微生物群落结构进行分析发现,投加GAC的实验组中富集了大量可能具有胞外电子传递功能的细菌(*Syntrophomonas*和*Geobacter*),以及可以参与DIET的产甲烷菌(*Methanosarcina*),表明投加GAC可以有效富集以上三种微生物,并通过GAC作为电子载体促进菜籽油厌氧反应体系中DIET的形成,进而促进菜籽油的降解,提高甲烷产量。

**关键词:** 厌氧消化; 直接种间电子传递; 餐厨垃圾; 食用油; 微生物群落结构

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0109-06

## Methanogenesis of Edible Oil from Kitchen Waste Enhanced by Granular Activated Carbon

XU Yue<sup>1</sup>, LIAO Huan<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, LU Hai-jun<sup>1</sup>, WEI Na<sup>1</sup>, HE Xing-hua<sup>1</sup>,  
ZHANG Rong-tang<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>2</sup>, WANG Hong-yu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** Direct interspecies electron transfer (DIET) was enhanced by adding granular activated carbon (GAC), so as to improve the anaerobic methanogenic efficiency of common edible oil from kitchen waste. In addition, the effect of GAC on microbial community composition was analyzed. Compared with the control group without GAC, the experimental group with GAC efficiently and stably produced methane through anaerobic digestion. During the anaerobic digestion of rapeseed oil, the acetic acid concentration in the control group reached the maximum value (7 mmol/L) on day 7 and remained basically unchanged thereafter. However, in the experimental group, the acetic acid concentration reached the maximum value (3.9 mmol/L) on day 7, and then gradually decreased to zero on day 13. Meanwhile, the maximum methane

基金项目: 武汉轻工大学科研项目(45); 2020年湖北省建设科技计划项目(35)

通信作者: 张静 E-mail: zj220220@126.com

production in the experimental group was approximately 3.5 times that in the control group. Therefore, the addition of GAC promoted the degradation of acetic acid and the conversion of methane. Analysis of microbial community composition showed that a large number of bacteria (*Syntrophomonas* and *Geobacter*) that might have extracellular electron transfer function and a methanogen (*Methanosarcina*) that participated in DIET were enriched in the experimental group. The results suggested that the addition of GAC could enrich these three groups of microbes, and promote the formation of DIET in the rapeseed oil anaerobic digestion system through GAC as an electron carrier, thus promoting the degradation of rapeseed oil and improving the methane production.

**Key words:** anaerobic digestion; direct interspecies electron transfer; kitchen waste; edible oil; microbial community composition

目前,全世界餐厨垃圾产量达到 $14 \times 10^8$  t/a<sup>[1-3]</sup>,仅在中国每年就有将近 $60 \times 10^4$  t的餐厨垃圾产生,并且其产量随着经济的发展和人口的增长仍将持续升高<sup>[4]</sup>。餐厨垃圾以淀粉、食物纤维类、蛋白质、油脂等为主要成分,这些物质极易腐败、霉变,但同时也是厌氧消化产甲烷的理想基质。在我国饮食文化中,多以煎、炒、炸、煮、炖等方式烹饪食物,烹饪过程中会用到食用油。因此,在餐厨垃圾中就不不可避免地存在一定量的食用油。有研究报道,在标准温度和压力下,理论上1 L油脂的产甲烷潜力为0.99 L,而糖类和蛋白质的产甲烷潜力分别为0.42 L和0.63 L,可见油脂有很大的产甲烷潜力<sup>[5]</sup>。然而,在厌氧消化过程中,油脂的水解速率较低,易产生累积,从而形成“油粒”和“油泥”,阻断油脂与微生物的接触途径,减少有效微生物的量,抑制厌氧发酵产甲烷<sup>[6]</sup>。因此,合理高效地降解餐厨垃圾中的油脂(尤其是常用食用油)至关重要。

近几年来,研究发现厌氧消化产甲烷过程中存在一种新的电子传递途径,即直接种间电子传递(DIET)<sup>[7-8]</sup>。DIET可以通过导电菌毛或导电材料,直接从产生胞外电子的微生物处得到电子<sup>[9-10]</sup>。与传统的 $H_2$ /甲酸种间电子传递相比,DIET的电子传递途径短、能量消耗低、能量储存高、菌种的种类少、稳定性高。因此,DIET的发现为厌氧消化产甲烷开辟了新途径。

食用油作为餐厨垃圾油脂的重要组成部分,它的特性决定了其厌氧消化的敏感性。笔者基于厌氧消化过程中DIET,通过向单相完全混合反应器中投加一定量的颗粒活性炭(GAC)来强化4种常见食用油(花生油、玉米油、菜籽油和大豆油)的厌氧消

化产甲烷效能,重点考察GAC对菜籽油厌氧消化产甲烷和挥发性脂肪酸(VFAs)的影响,并对投加GAC实验组的微生物群落进行了分析,从微生物学角度揭示投加GAC强化菜籽油厌氧消化产甲烷的原因。

## 1 材料与方 法

### 1.1 接种污泥与食用油

接种污泥来自于美国某污水处理厂的厌氧池。使用前储存在4℃环境中。实验中用到的4种常见食用油(菜籽油、玉米油、大豆油和花生油)购自美国某公司。

### 1.2 实验方法

实验所用反应器为血清瓶,瓶口用聚四氟乙烯塞子封住,然后再用铝盖将其密封。设置4组实验,每组实验设置6个反应器,向3个反应器中投加GAC(实验组,颗粒活性炭,黑色,粒径为8~20目,体积为120 cm<sup>3</sup>,比表面积约为900 cm<sup>2</sup>/g,电导率约为26 μS/cm),剩余3个反应器不投加任何材料(对照组)。

向血清瓶中加入15 mL的FWNN培养基,并在实验组中投加2 g GAC。其中,FWNN培养基的成分为:KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O(0.6 g/L)、NH<sub>4</sub>Cl(0.25 g/L)、KCl(0.1 g/L)、微量元素溶液(10 mL/L)、维生素溶液(10 mL/L)。微量元素溶液的组成:NTA-3Na(1.5 g/L)、MgSO<sub>4</sub>(3 g/L)、MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O(0.5 g/L)、NaCl(1 g/L)、FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O(0.1 g/L)、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O(0.1 g/L)、NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(0.024 g/L)、CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(0.01 g/L)、ZnCl<sub>2</sub>(0.13 g/L)、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O(0.01 g/L)、KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O(0.01 g/L)、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>(0.01 g/L)、Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O(0.025 g/L)、Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O(0.025 g/L)。维生素溶液的组成:维生素H(0.002 g/L)、维生素B5(0.005

g/L)、维生素 B12(0.000 1 g/L)、对氨基苯甲酸(0.005 g/L)、硫辛酸(0.005 g/L)、烟酸(0.005 g/L)、维生素 B1(0.005 g/L)、维生素 B2(0.005 g/L)、盐酸维生素 B6(0.01 g/L)、叶酸(0.002 g/L)。然后,每个瓶子充 0.5 h 的  $N_2(80\%)/CO_2(20\%)$  混合气体来保证瓶内为厌氧环境,放到 120 °C 的灭菌锅内灭菌 30 min 后,降至室温备用。之后,每个瓶子接种 2 mL 混合均匀的厌氧污泥,4 组反应器中分别加入 1 mL 的菜籽油、玉米油、大豆油和花生油。最后,将反应器放置在 37 °C 的恒温室中,黑暗条件下厌氧发酵,每 7 d 测一次甲烷,当甲烷浓度超过 3 000 nmol/L 时转接一次。对于投加 GAC 的实验组,转接操作方法:在无菌厌氧操作台中,取出 15 mL 经过充分振荡的发酵液并保留所有活性炭,之后再加入 15 mL 灭菌后的 FWNN 培养基和 1 mL 食用油。对照组的转接操作方法:在无菌厌氧操作台中,取出 15 mL 发酵液后,再加入 15 mL 灭菌后的 FWNN 培养基和 1 mL 食用油。厌氧培养一段时间,当甲烷产量稳定后,通过高通量测序技术分析菜籽油厌氧发酵过程中微生物的群落结构。

### 1.3 分析项目与方法

VFAs 采用高效液相色谱仪测定。从反应器中取 0.5 mL 沼气,用配有氢火焰离子检测器的气相色谱仪分析沼气成分。

DNA 的提取与高通量测序:首先,在实验组取 1/4 的 GAC(0.5 g)和 1/4 的反应液(4.25 mL),然后剧烈涡流 5 min,在 14 000 r/min 转速下离心 5 min,收集混合污泥样品。从对照组直接取 2 mL 的混合反应液作为污泥样品。对照组和实验组污泥样品的编号分别为 A1 和 A2。根据 DNA 快速提取试剂盒说明书提取 DNA,提取后的 DNA 经微量紫外分光光度计测定纯度,然后委托上海美吉生物医药科技有限公司进行测序。

## 2 结果与讨论

### 2.1 GAC 对厌氧消化产甲烷的强化效果

GAC 对不同食用油厌氧消化产甲烷的影响如图 1 所示。可以看出,实验组的甲烷产量显著大于对照组,尤其是在转接之后。在未转接之前,实验组的甲烷产量与对照组在最初 10 d 内差别并不明显。但是,转接之后,对照组的甲烷产量明显降低,甚至经过很长一段时间厌氧消化后,甲烷产量仍比

较低。相反,实验组的甲烷产量在转接之后仍然很稳定,且甲烷产量也很高。可见,投加 GAC 可以有效提高 4 种食用油的厌氧消化产甲烷效能。

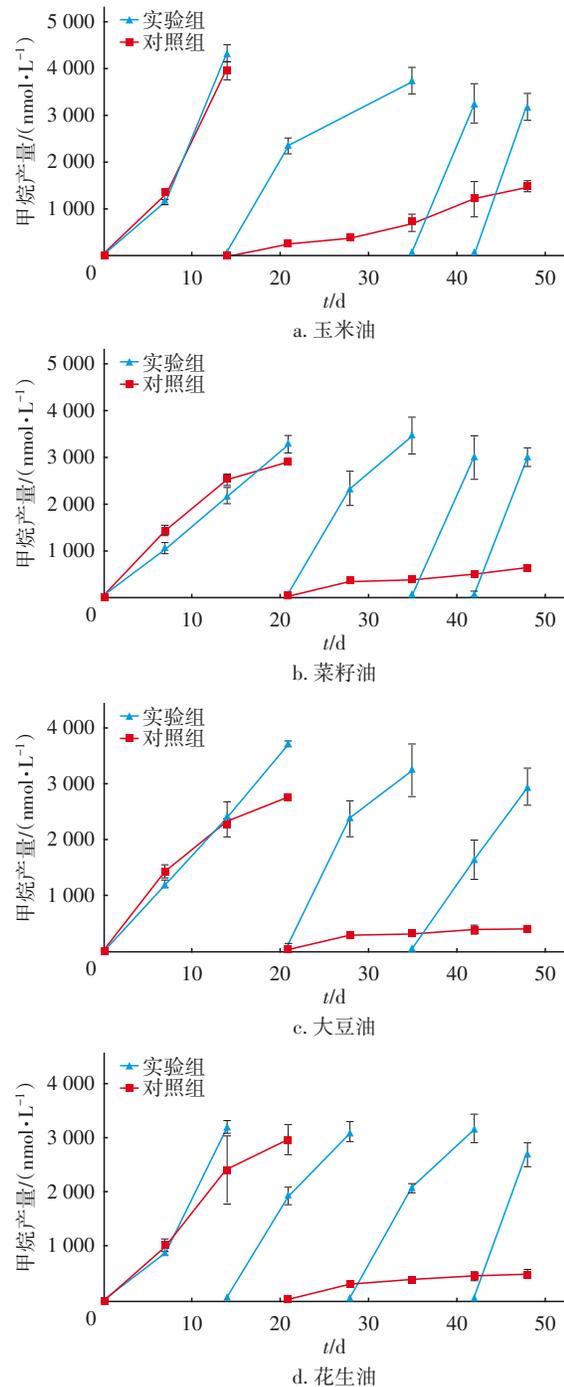


图1 GAC 对不同食用油厌氧消化产甲烷的影响

Fig.1 Effects of GAC on methane production of different edible oil during anaerobic digestion process

在投加 GAC 的实验组中,菜籽油和玉米油需要经过两次转接,甲烷产量才可以在一周内超过 3 000 nmol/L,而大豆油和花生油在两次转接后,一

周内的甲烷产量明显低于3 000 nmol/L。因此,投加GAC对菜籽油和玉米油厌氧消化产甲烷的促进作用要大于对大豆油和花生油。GAC具有一定的吸附作用,当投加GAC时,微生物会附着在其表面,经过第一次转接后,实验组中厌氧微生物量比对照组多一些,因此,实验组甲烷产量在第一次转接后显著高于对照组。但是经过多次转接后,实验组中的厌氧微生物量同样也会减少很多。然而,此时实验组的甲烷产量仍然显著高于对照组,这说明投加GAC影响了厌氧微生物的群落结构,从而使得该组的甲烷产量显著高于对照组。

## 2.2 GAC对厌氧消化产甲烷和VFAs的影响

图2为GAC对菜籽油厌氧消化产甲烷和VFAs的影响。在菜籽油厌氧消化过程中,乙酸是唯一一种被检测到的VFAs,且实验组与对照组乙酸浓度的变化显著不同。从图2(a)可知,对照组中,乙酸浓度在第一周内迅速升高,然后,保持在7 mmol/L左右。而在投加GAC的实验组中,乙酸浓度先升高,并在第7天达到3.9 mmol/L,然后逐渐降低,到第13天基本为0。

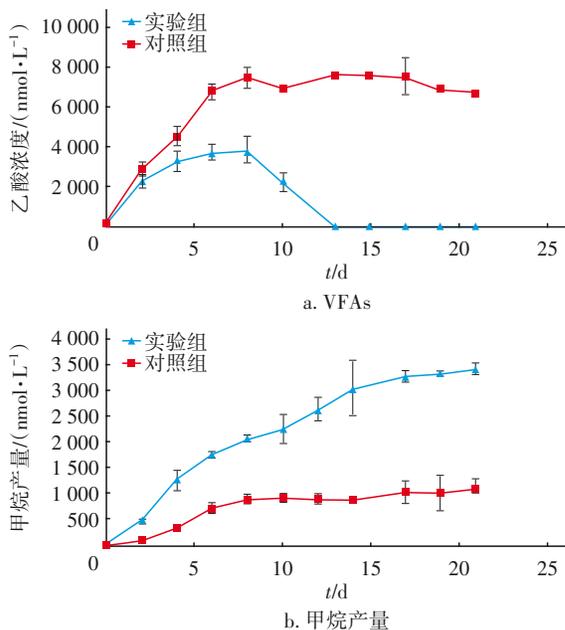


图2 GAC对菜籽油厌氧消化产甲烷和VFAs的影响

Fig.2 Effects of GAC on methane production and VFAs of rapeseed oil during anaerobic digestion process

从图2(b)可知,实验组的最大甲烷产量约为3 500 nmol/L,而对照组的最大甲烷产量约为1 000 nmol/L。此外,对照组产甲烷速率明显滞后于实验

组。VFAs是影响厌氧消化产甲烷的重要中间代谢产物,其浓度过高会产生酸累积,从而降低甲烷产量<sup>[11-12]</sup>。对照组和实验组甲烷产量的变化可以归因于乙酸浓度的差异。对于实验组,在开始的7 d内乙酸的浓度不断增加,对产甲烷菌的抑制越来越强,甲烷产量的增加速度越来越慢,之后乙酸浓度开始降低,对产甲烷菌的抑制作用降低,因而甲烷产量增加速率明显加快,尤其是在13 d之后,乙酸浓度几乎为0,甲烷产量的增加速度更快。相比之下,对照组在初始一周内乙酸浓度不断升高,对产甲烷菌的抑制作用越来越强,甲烷产量的增加速度不断降低,直至乙酸浓度达到最大值并基本保持稳定后,对产甲烷菌产生抑制作用,所以此后甲烷产量也基本保持稳定。可见,投加GAC不仅可以降低乙酸浓度,还可以增大甲烷产量。

## 2.3 微生物群落结构的变化

通过高通量测序技术对经过70 d厌氧消化的对照组和实验组内混合沼液进行了微生物群落结构分析。对照组与实验组中细菌在属水平上的组成如图3所示。可知,在对照组中,相对丰度大于1%的厌氧菌有*Anaerosinus*、*Syntrophomonas*、*Desulfovibrio*、*Salinispira*和*Aminicenantes*,相对丰度分别为17.41%、6.24%、6.22%、1.74%和1.04%。其中*Syntrophomonas*是厌氧反应器中非常重要的一种微生物,它可以将有机酸降解为乙酸并产生H<sub>2</sub><sup>[13]</sup>。而*Anaerosinus*、*Desulfovibrio*、*Salinispira*和*Aminicenantes*可以将复杂有机物降解为有机酸。因此,在对照组中,菜籽油首先被*Anaerosinus*、*Desulfovibrio*、*Salinispira*、*Aminicenantes*降解为有机酸,再被*Syntrophomonas*进一步降解为乙酸。对照组中,相对丰度大于1%的厌氧细菌均不具备胞外电子传递功能,因而没有发现可以作为电子供体进行DIET的细菌。而在实验组中,相对丰度大于1%的厌氧菌有*Syntrophomonas*、*Ralstonia*、*Candidatus Cloacamonas*、*Leploleina*、*Syntrophobacter*、*Carboxylicivirga*、*Salinispira*、*Desulfovibrio*和*Geobacter*,相对丰度分别为23.2%、13.62%、3.09%、2.23%、1.8%、1.47%、1.41%、1.31%和1.17%。实验组中*Syntrophomonas*为主导菌群,且其相对丰度约为对照组的4倍。可见,投加GAC促进了*Syntrophomonas*的富集。已有研究表明<sup>[14-15]</sup>,*Syntrophomonas*不仅可以与某些产甲烷菌形成共生关系来产甲烷,而且还可以降解长链脂肪酸。由于在油脂厌氧消化过

程中会产生大量长链脂肪酸,因而 *Syntrophomonas* 的富集有助于促进菜籽油的降解和产甲烷。虽然目前还没有研究能够直接证明 *Syntrophomonas* 可以进行胞外电子转移,但是很多研究已经报道了 *Syntrophomonas* 在产甲烷和电化学生物系统中的一些导电材料或电流采集电极上极易产生富集,这可能是由于 *Syntrophomonas* 可以作为电子供体将电子传递给产甲烷菌,以利用  $\text{CO}_2$  产生甲烷<sup>[16-17]</sup>。因此, *Syntrophomonas* 可以与一些甲烷古菌形成共生关系进行 DIET 促进产甲烷。此外,在实验组相对丰度大于 1% 的细菌中发现了 *Geobacter*。 *Geobacter* 可以进行胞外电子转移,如 *G. sulfurreducens* 可以利用细胞外金属(铁和锰氧化物)作为能量代谢的终端电子受体,并且在以醋酸盐为唯一底物的生物电化学体系的阳极上经常被检测到。因此,根据 *Geobacter* 在实验组中的富集,可以推测投加 GAC 促进了 DIET 在该厌氧发酵过程中的形成。

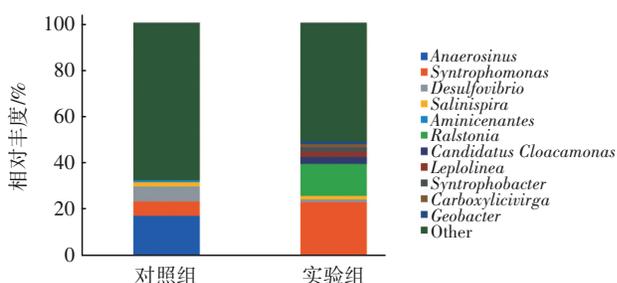


图3 GAC对厌氧体系中细菌群落结构的影响

Fig.3 Effect of GAC on bacterial community composition in anaerobic system

GAC对厌氧体系中古菌群落结构的影响如图4所示。可知,对照组中相对丰度大于1%的古菌主要有 *Methanolinea*、*Methanospirillum*、*Methanoregula* 和 *Methanothrix*, 相对丰度分别为 56.22%、27.27%、12.61% 和 1.83%。而实验组中相对丰度大于1%的古菌主要有 *Methanoregula*、*Methanosarcina*、*Methanospirillum*、*Methanolinea* 和 *Methanothrix*, 相对丰度分别为 73.3%、21.36%、1.57%、1.43% 和 1.21%。两组古菌的组成有非常显著的区别。目前已经发现的可以参与 DIET 产甲烷的古菌只有 *Methanosarcina* 和 *Methanosaeta*, 这两种细菌可以直接接受胞外电子将二氧化碳转化成甲烷<sup>[7,18]</sup>。在对照组相对丰度大于1%的古菌中未发现 *Methanosarcina* 和 *Methanosaeta*。然而,在实验组中 *Methanosarcina* 的相对丰度为 21.36%。可见,投加 GAC 促进了

*Methanosarcina* 的富集。*Methanosarcina* 是一种可以利用乙酸产甲烷的古菌。因此,在菜籽油厌氧消化过程中,实验组中的乙酸浓度显著低于对照组可以归因于 *Methanosarcina* 的富集。

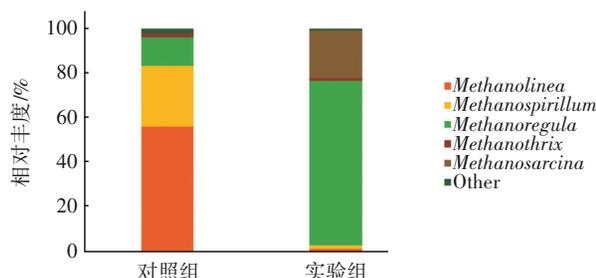


图4 GAC对厌氧体系中古菌群落结构的影响

Fig.4 Effect of GAC on archaea community composition in anaerobic system

基于实验组中具有胞外电子传递功能的 *Syntrophomonas* 和 *Geobacter*, 以及能够直接接受供电细菌胞外电子的 *Methanosarcina* 的富集, 可以假设 GAC 促进了菜籽油厌氧反应体系中 DIET 的形成, 进而强化了菜籽油的降解, 提高了甲烷产量。但是, 没有直接证据可以证明 *Syntrophomonas* 具有胞外电子传递功能, 因此投加 GAC 促进菜籽油厌氧消化体系中微生物群落进行 DIET 的猜想仍需进一步研究。

### 3 结论

投加 GAC 可以显著提升餐厨垃圾中常见食用油(菜籽油、玉米油、大豆油和花生油)厌氧消化产甲烷的效能, 尤其是在转接之后, 实验组的甲烷产量显著高于对照组。其中在菜籽油厌氧消化过程中, 乙酸作为唯一的 VFAs, 其在对照组中的浓度高于实验组, 且实验组的甲烷产量高于对照组, 这表明投加 GAC 促进了乙酸的降解和甲烷的转化。高通量测序结果表明, 投加 GAC 可能促进了具有胞外电子传递功能细菌 *Syntrophomonas* 和 *Geobacter*, 以及可作为电子受体参与 DIET 的产甲烷菌 *Methanosarcina* 的富集。因此, 推测投加 GAC 作为电子传递载体可以将 *Syntrophomonas* 和 *Geobacter* 降解菜籽油产生的电子传递给产甲烷菌 *Methanosarcina* 来产甲烷, 形成 DIET, 强化菜籽油的厌氧消化产甲烷效能。

### 参考文献:

- [1] KIRAN E U, TRZCINSKI A P, NG W J, et al. Bioconversion of food waste to energy: a review [J].

- Fuel, 2014, 134: 389-399.
- [ 2 ] WONG J W C, KAUR G, MEHARIYA S, *et al.* Food waste treatment by anaerobic co-digestion with saline sludge and its implications for energy recovery in Hong Kong [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 824-828.
- [ 3 ] GU J, LIU R, CHENG Y, *et al.* Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: focusing on synergistic effects on methane production [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122765.
- [ 4 ] LI Y Q, ZHANG R H, LIU X Y, *et al.* Evaluating methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste, corn stover, and chicken manure [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27 (4): 2085-2091.
- [ 5 ] 彭荫来, 杨帆. 利用餐饮业废油脂制造生物柴油[J]. *城市环境与城市生态*, 2001, 14(4): 54-56.  
PENG Yinlai, YANG Fan. On making biodiesel by waste fat from restaurant [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2001, 14(4): 54-56(in Chinese).
- [ 6 ] 万红, 黄高杰, 刘虎成. 油脂对污泥和餐厨垃圾厌氧消化的影响[J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(5): 95-98.  
WAN Hong, HUANG Gaojie, LIU Hucheng. Effects of lipid on anaerobic digestion of sludge and food waste [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 44(5): 95-98(in Chinese).
- [ 7 ] ROTARU A E, SHRESTHA P M, LIU F H, *et al.* Direct interspecies electron transfer between *Geobacter metallireducens* and *Methanosarcina barkeri* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80 (15): 4599-4605.
- [ 8 ] LEI Y Q, SUN D Z, DANG Y, *et al.* Metagenomic analysis reveals that activated carbon aids anaerobic digestion of raw incineration leachate by promoting direct interspecies electron transfer [J]. *Water Research*, 2019, 161: 570-580.
- [ 9 ] CHEN S S, ROTARU A E, LIU F H, *et al.* Carbon cloth stimulates direct interspecies electron transfer in syntrophic co-cultures [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 173: 82-86.
- [ 10 ] DANG Y, SUN D Z, WOODARD T L, *et al.* Stimulation of the anaerobic digestion of the dry organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) with carbon-based conductive materials [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 30-38.
- [ 11 ] DHAR H, KUMAR P, KUMAR S, *et al.* Effect of organic loading rate during anaerobic digestion of municipal solid waste [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 56-61.
- [ 12 ] LI Q, LI H, WANG G C, *et al.* Effects of loading rate and temperature on anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high frequency feeding system, looking in particular at stability and efficiency [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 237: 231-239.
- [ 13 ] ZHENG S L, WANG B C, LI Y, *et al.* Electrochemically active iron (III)-reducing bacteria in coastal riverine sediments [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2017, 57(12): 1045-1054.
- [ 14 ] RASIT N, IDRIS A, HARUN R, *et al.* Effects of lipid inhibition on biogas production of anaerobic digestion from oily effluents and sludges: an overview [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 351-358.
- [ 15 ] ZHAO Z Q, ZHANG Y B, HOLMES D E, *et al.* Potential enhancement of direct interspecies electron transfer for syntrophic metabolism of propionate and butyrate with biochar in up-flow anaerobic sludge blanket reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 209: 148-156.
- [ 16 ] LI H J, CHANG J L, LIU P F, *et al.* Direct interspecies electron transfer accelerates syntrophic oxidation of butyrate in paddy soil enrichments [J]. *Environmental Microbiology*, 2015, 17(5): 1533-1547.
- [ 17 ] ZHAO Z S, ZHANG Y B, QUAN X, *et al.* Evaluation on direct interspecies electron transfer in anaerobic sludge digestion of microbial electrolysis cell [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 235-244.
- [ 18 ] ROTARU A E, WOODARD T L, NEVIN K P, *et al.* Link between capacity for current production and syntrophic growth in *Geobacter* species [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 744.

作者简介: 许跃(1998-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要研究方向为生物炭开发及其去除水体中污染物。

E-mail: yuexu2020@126.com

收稿日期: 2020-02-25

修回日期: 2020-03-30

(编辑: 任莹莹)