

油脂对餐厨废弃物单相厌氧定向制酸的影响

王 权¹, 蒋建国^{1,2,3*}, 张昊巍¹, 李梦露¹ (1.清华大学环境学院, 北京 100084; 2.固体废弃物处理与环境安全教育部重点实验室, 北京 100084; 3.清华大学区域环境质量协调创新中心, 北京 100084)

摘要: 通过间歇实验研究了油脂对餐厨废弃物单相厌氧定向产酸(VFA)的影响。考察了油脂含量为 0.0、5.0、15.0 及 25.0g/L 条件下发酵液中有机酸浓度及组成的变化情况。结果表明, 油脂对发酵液中 VFA 浓度影响显著, 随油脂含量提高最大 VFA 浓度呈下降趋势, 当油脂含量达到 25.0g/L 时, 最大 VFA 浓度仅为 23.22g/L, 为未添加油脂条件下的 55.3%, 其次油脂可延后开始产酸的时间, 油脂含量为 5.0g/L 时, 达到最高 VFA 浓度 50% 所需的反应时间分别为 49.4h 相对未添加油脂组滞后 27.1h。此外油脂会影响发酵液中 VFA 各组分比例, 提高丙酸含量促使发酵类型由丁酸型发酵向丙酸型发酵转变, 当油脂含量为 5.0g/L 时丙酸所占比例分别为 32.2%, 而未添加油脂组的丙酸含量仅占 8.7%。

关键词: 厌氧; 挥发性脂肪酸(VFA); 发酵; 油脂; 废物处理; 餐厨垃圾

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2015)05-1436-06

Effect of grease on acid fermentation of kitchen waste by single phase anaerobic methods. WANG Quan¹, JIANG Jian-guo^{1,2,3*}, ZHANG Hao-wei¹, LI Meng-lu¹ (1.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Key Laboratory for Solid Waste Management and Environment Safety, Ministry of Education, Beijing 100084, China; 3.Collaborative Innovation Center for Regional Environmental Quality, Tsinghua University, China). *China Environmental Science*, 2015,35(5): 1436~1441

Abstract: Under the optimum reaction conditions (pH 6.0, the temperature of 35 °C), batch experiments were carried out to determine the effect of grease content on volatile fatty acid (VFA) concentration and composition during anaerobic acidogenesis of kitchen wastes. The grease content was controlled at 0.0g/L, 5.0g/L, 15.0g/L, and 25.0g/L. The results showed that, the effect of grease on VFA concentration was significantly, and maximum VFA concentration decreased with the amount of grease improved. When the amount reached 5.0g/L, 15.0g/L and 25.0g/L, VFA maximum concentration reached 38.84g/L, 33.88g/L and 23.22g/L, which was only 92.5, 80.7 and 55.3 percent of not adding grease. Second, the grease may arrest acid production, under the grease content of 5.0g/L, 15.0g/L and 25.0g/L, the half of highest VFA concentration required 49.4h, 56.4h, 58.8h, which was lag 27.1h, 34.1h, 36.5h relative to the group without adding grease. Also grease can affect the proportion of each component of VFAs. It changed acid-type from butyric acid type fermentation to propionic acid type fermentation with improving the propionic acid content. When the amount of grease reached 5.0, 15.0 and 25.0g/L, the proportion of propionic acid reach up to 32.2%, 23.0% and 20.5%, which was only 8.7 percent in control experiment.

Key words: anaerobic; volatile fatty acid (VFA); fermentation; grease; waste treatment; kitchen waste

餐厨废弃物是城市生活垃圾的重要组成部分, 占城市生活垃圾总量的 30%~50%^[1]。近年来, 餐厨废弃物的减量化、无害化、资源化处理已成为普遍关注的焦点^[2-4]。目前, 我国的餐厨废弃物除用作饲料养猪外, 大部分都是以填埋的形式处理, 占用了大量的土地资源^[5], 少部分采用厌氧消化工艺生产甲烷, 但其在实际工程中的应用并不理想。

与传统产甲烷工艺^[6-8]不同, 餐厨废弃物单相厌氧定向制酸工艺基于厌氧消化四阶段理论, 其目标产物为挥发性脂肪酸。在厌氧消化水解阶段, 不溶性的大分子有机物首先被转化为能被细

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07301-001)。

* 责任作者, 教授, jiangguoj@tsinghua.edu.cn

菌所利用的小分子有机物,之后在发酵细菌的作用下,转化为长链脂肪酸、糖类、氨基酸等物质,最终形成以短链挥发性有机酸(乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、己酸等)、乙醇为主的末端发酵产物^[9-10].研究表明,在此阶段,可以控制发酵条件(pH 值、温度、有机负荷、接种率等)使挥发性脂肪酸(VFA)在发酵液中快速大量积累,在 4d 内可使发酵体系中 VFA 浓度达到 40g/L^[11-12],产生的富集 VFA 与乙醇的发酵液可直接

用作污水脱氮除磷或垃圾渗滤液处理的外加碳源^[13-14],有研究表明通过餐厨废弃物单相厌氧定向制酸工艺生产的碳源的应用效果要优于甲醇、乙酸钠等传统碳源^[15].

由于烹饪过程中油脂的添加,餐厨废弃物中含有大量的油脂.大量研究表明,油脂会包裹发酵体系中的微生物并将其带到发酵体系上层,降低发酵体系中微生物量,此外油脂的水解产物长链脂肪酸(LCFA)会吸附在产甲烷菌细胞膜上,干扰微生物对有机质的吸收^[16-17],证明油脂对厌氧发酵产甲烷抑制明显.此外,国外有学者利用固定床反应器,研究了油脂及油酸对厌氧微生物生物量的影响,发现微生物量随油脂含量增加而减少^[18].在此基础上,又有文献报道了 LCFA 对厌氧微生物群落的影响^[19],而将 VFA 作为厌氧发酵最终代谢产物进行的研究却不充分.故本课题在前一阶段的研究中,明确了温度、pH 值、接种比例、含固率及 NaCl 对餐厨垃圾厌氧产 VFAs 的影响^[20-23].在此基础上,本文研究了 VFA 快速大量积累的体系中,不同浓度梯度油脂对产 VFA 浓度及组分的影响.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用餐厨废弃物由米饭、面片、白菜、猪肉和豆腐配制而成,上述 5 种成分的质量分数分别为 18%、17%、45%、16%和 4%.将其混合后加入食物搅拌机搅碎后储存于 4℃冰箱中待用,经过检测该餐厨垃圾的总固体含量(TS)与挥发性固体含量(VS)分别为 181.8、175.1g/L,C、H、N、O 四种元素所占比例分别为 48.61%、6.10%、

3.97%及 36.33%,其 C/N 比为 12.24.实验时取该餐厨废弃物,再次测定 TS 及 VS 后,用自来水分别将上述餐厨废弃物稀释至特定含固率后使用.

实验中添加的油脂为金龙鱼牌调和油(花生油 55%、葵花油 22%、亚麻油 12%、大豆油 6%、菜籽油 5%),接种污泥为取自北京高碑店污水处理厂的厌氧消化污泥,自然存放 3d 后,去除上清液待用.经过测定,该消化污泥 TS 为 4.5%,VS 为 2.2%,C/N 为 8.5,SCOD 为 1775mg/L, pH 值为 6.34.

1.2 实验装置与方法

实验装置由高硼硅玻璃制成,有效容积为 4.5L,高径比为 2.2:1(见图 1).温度可通过传感器控制在 $(35.0\pm 1.0)^{\circ}\text{C}$,搅拌由可编程逻辑控制器(PLC)控制在 200r/min,实时监测反应器内氧化还原电位(ORP)及 pH 值,并通过实时加入 HCl(5mol/L)和 NaOH(5mol/L),将反应器的 pH 值控制在 6.0.在发酵反应开始前物料加入反应器后,需用高纯氮气吹脱 1min 以驱除反应器内的空气.实验过程中,每天使用蠕动泵取样 1~3 次,持续发酵 120h.

本实验包括 4 批发酵反应,发酵基质为 3L 稀释至 TS 为 150.0g/L 的餐厨垃圾,分别添加 0.0、5.0、15.0、25.0g/L 油脂后,与 800mL 消化污泥混合,倒入反应器中进行发酵.

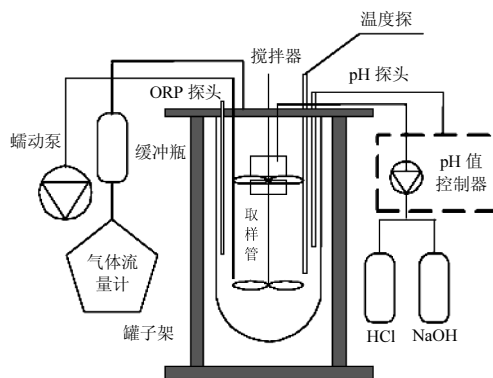


图 1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of anaerobic fermentation

1.3 分析方法

TS、VS 采用重量法测定^[24],ORP 采用梅特

勒 pt4805-DPAS-Sc-K8S-225 测定,溶解性化学需氧量(SCOD)、氨氮、VFA、乙醇等经过预处理后测定.预处理方法为将样品以 15000r/min 离心 15min,上清液采用 0.45 μ m 水系滤膜过滤.其中 SCOD 以重铬酸钾法测定^[25],氨氮以纳氏试剂分光光度法^[26]测定.VFA(乙酸、丁酸、异丁酸、丁酸、异戊酸、戊酸)和乙醇采用气相色谱法测定.所用仪器为岛津 GC-2010plus,测试条件为进样口温度 220℃,检测器温度 250℃,不分流进样,柱子为毛细管柱 stabliwax-DA,柱温由 60℃以 7℃/min 的速率升到 150℃,保持 5min,之后以 20℃/min 速率升高到 230℃,保持 10min.其中 VFAs 浓度及组分的测定重复 3 次.

2 结果与讨论

2.1 VFA 浓度随油脂含量的变化

由图 2 可见,随着发酵时间的延长,空白对照实验组的 VFA 浓度先快速上升后趋于稳定,之后再逐渐下降,而添加油脂实验组的 VFA 浓度前期增加缓慢,之后才逐渐上升.从发酵产 VFA 总量来看(见表 1),在发酵反应持续的 120h 内,对照组、添加 5.0、15.0 与 25.0g/L 油脂组分别于第 54、84、90、114h 达到最大 VFA 浓度 41.99、38.84、33.88、23.22g/L.表明发酵体系中存在的油脂会对厌氧发酵产酸造成抑制^[18,27],且随油脂含量增加,抑制强度逐渐提高.

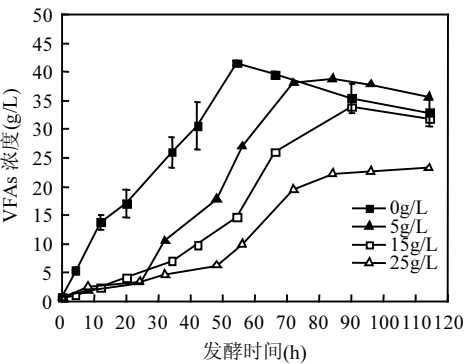


图 2 不同油脂含量下 VFA 浓度随时间的变化
Fig.2 Variation of VFA yield at different grease content

该抑制效应表现为两个方面,即对最大产酸

量的降低与对发酵产酸启动时间的滞后.当油脂含量从 0.0g/L 升至 5.0g/L 时,最大 VFA 浓度降低了 7.5%,从 5.0g/L 升至 15.0g/L 时,最大 VFA 浓度降低了 12.8%,从 15.0g/L 升至 25.0g/L 时,最大 VFA 浓度降低了 31.5%,这表明油脂对最大产酸量的降低效应在油脂含量超过 15.0g/L 后趋于显著;另一方面,对照组、添加 5.0、15.0 与 25.0g/L 油脂组发酵达到最高 VFA 浓度 50%所需的反应时间分别为 22.3、49.4、56.4、58.8h,这表明在油脂添加量达到 5.0g/L 时对发酵产酸的滞后效应已相当显著,然而随油脂含量进一步增加对产酸滞后幅度的增加却不大.这是因为油脂的密度小于水的密度且不溶于水,大部分油脂都分布在发酵液上层,尽管油脂含量的大幅增加,但分散在发酵液体系内对产酸造成主要影响的这部分油脂增加量却不大.

根据调查^[28-29]我国餐厨废弃物中油脂含量在 20~30g/L 之间,故从工程角度分析,在建设餐厨废弃物厌氧发酵产酸工程时,必须考虑配套脱油设备,尽可能回收利用餐厨废弃物中的油脂.采用餐厨废弃物粉碎脱水后再油水分离的工艺可回收餐厨废弃物中 80%以上的油脂,使处理后的餐厨废弃物中油脂含量降至 5g/L 左右,基本消除油脂对发酵产酸浓度的影响.

表 1 不同油脂含量下 VFA 及氨氮浓度变化
Table 1 Variation of VFA and ammonia nitrogen concentration at different grease content

编号	初始 VFA 浓度 (g/L)	初始氨氮 浓度 (mg/L)	最大 VFA 浓度 (g/L)	最大氨氮 浓度 (mg/L)
a	0.59	369.5	41.99	1457.7
b	0.72	378.1	38.84	1396.0
c	0.60	407.6	33.88	1515.2
d	0.49	331.4	23.22	1498.1

2.2 VFA 组分随油脂含量的变化

各批次实验发酵液中 VFA 浓度达到最大值时各组分比例如表 2 所示,与结合图 3 可以看出,在各批次实验达到最大 VFA 浓度时,对照组的乙酸与丁酸含量之和占 VFA 与乙醇总量的 76.0%,

属于典型的丁酸型发酵(乙酸与丁酸含量之和占 VFA 与乙醇总量的比例大于 70%),而添加不同含量油脂后的乙酸与丁酸含量之和所占比例分别为 59.5%、67.7%、66.3%,已不属于典型的丁酸型发酵,而添加 5.0g/L 油脂的实验组丙酸所占比例甚至达到 32.2%,可归于丙酸型发酵一类^[30-31].

此外,从整个发酵过程来看,未添加油脂组发酵液中的丙酸所占比例较小且变化不大,而丁酸与乙酸是所占比例最高的两部分,并在发酵反应 34~66h 之间丁酸比例开始减小而乙酸比例增高,表征丁酸向乙酸转化的过程.相反添加油脂组发酵液中的丙酸所占比例较高并有逐渐增高的趋势,而丁酸所占比例达到最大值后无明显减少,各

组实验在发酵后期丁酸所占比例均较无油脂组的高.而各批次实验中乙醇所占比例均呈下降趋势,至发酵后期降至 10%左右.这是因为发酵体系中乙醇浓度在发酵初期达到峰值后保持稳定,故随 VFA 浓度的提高,其所占比例下降.

表 2 不同油脂含量下最大 VFA 浓度时各组分比例
Table 2 VFA composition under their maximum concentration at different grease content

编号	油脂含量 (g/L)	乙酸 (%)	丙酸 (%)	丁酸 (%)	乙醇 (%)
a	0.0	49.5	8.7	26.5	15.3
b	5.0	34.5	32.2	25.0	8.4
c	15.0	28.7	23.0	39.0	9.4
d	25.0	23.8	20.5	42.5	13.2

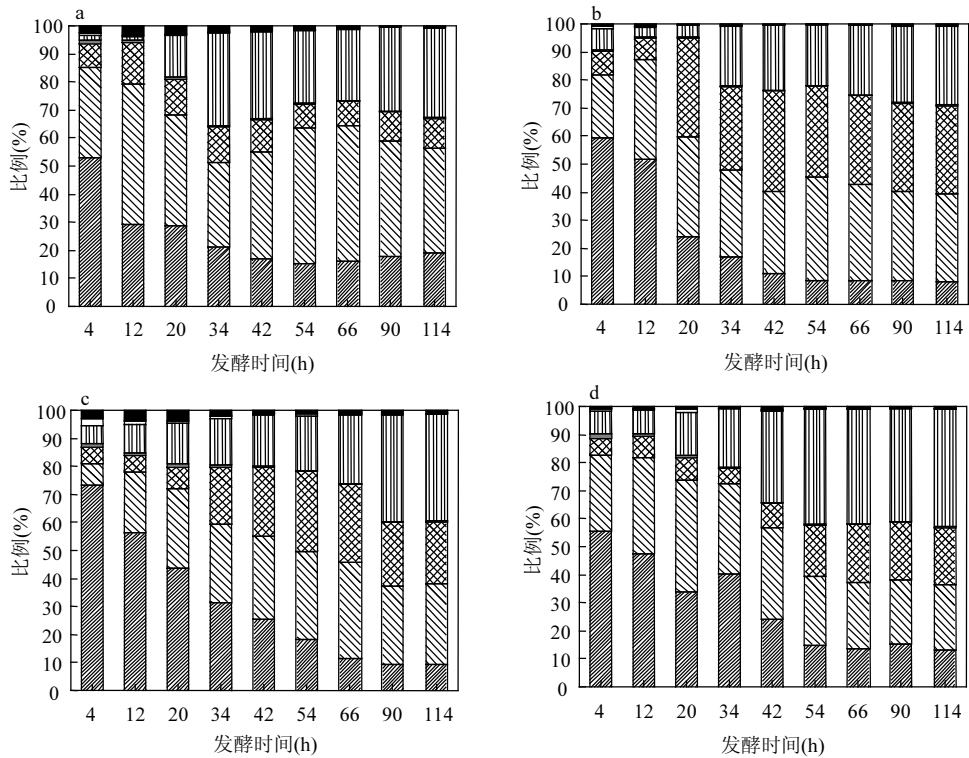


图 3 不同油脂含量下 VFA 组成随时间变化

Fig.3 Variation of VFA composition at different grease content

乙醇 乙酸 丙酸 异丁酸 丁酸 异戊酸 戊酸

上述实验现象表明餐厨废弃物中油脂会对发酵类型造成显著影响,油脂可促使发酵产物中丙酸与丁酸所占比例提高.这可能是因为油脂可

被水解为甘油与长链脂肪酸(LCFA),甘油的主要代谢产物为丙酸,而 LCFA 是强抑制因子抑制了丁酸向乙酸的分解代谢^[32],此外油脂作为难降解

有机物影响微生物细胞内 NADH 与 NAD⁺的含量也是造成丙酸积累的原因之一^[33]。

此外发酵液被用作污水处理脱氮除磷的外加碳源时,微生物对 VFA 各组分的利用顺序为乙酸、丁酸、丙酸^[34],丁酸型发酵产物更有利于脱氮除磷。故从此角度分析,对餐厨废弃物作深度脱油预处理是具有意义的。

2.3 SCOD 随发酵时间的变化

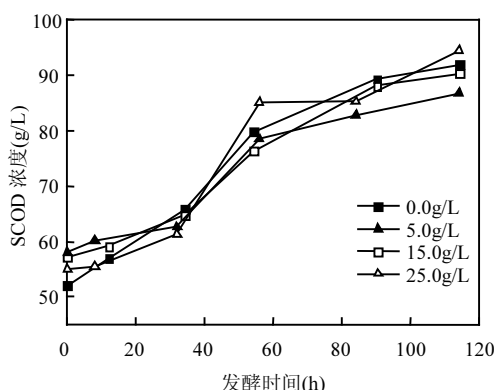


图 4 不同油脂含量下 SCOD 随时间变化

Fig.4 Variation of SCOD at different grease content

由图 4 可见,各批次发酵实验中 SCOD 呈现出相同的变化规律,即在监测的 120h 内 SCOD 均呈逐渐上升趋势,且在反应的 30~40h 之间 SCOD 上升速率较快,在反应至 114h 时各批次实验中 SCOD 达到最大值,分别为 91.93、86.70、90.27 及 94.42g/L。对各组实验进行统计分析后发现,随发酵时间延长,各组实验中 SCOD 浓度值的相对标准偏差分别为 0.041、0.031、0.027、0.041、0.029 及 0.031,均小于 0.05。这表明油脂未对发酵液中 SCOD 变化造成明显影响,发酵液中不溶性大分子有机物向可溶性小分子有机物的水解过程^[35]未受到显著抑制。而上文提到油脂可降低最大 VFA 产量并延后开始发酵产酸的时间,这表明油脂的抑制作用主要是作用在厌氧消化酸化阶段而对水解阶段影响较小。在发酵反应初期,大分子有机物迅速水解为小分子有机物,但由于油脂的抑制作用未能被产酸菌吸收利用,这些小分子有机物在发酵液中逐渐积累,至产酸菌适应高油脂环境开始产酸时,发

酵液中已积累大量可利用的小分子有机物,促使发酵液中 VFA 浓度迅速提高。

为深入讨论油脂在此过程中的降解情况,进一步的研究需要监测发酵过程中脂肪及 LCFA 的变化^[36],用以明确油脂与其降解产物 LCFA 对上述抑制效应的贡献,及定量分析因油脂降解产生乙酸与丙酸,造成 VFAs 组分变化的程度。

3 结论

3.1 油脂对厌氧发酵定向产酸有明显抑制作用,主要表现在对最高 VFA 浓度的降低及对发酵产酸的滞后,当油脂添加量为 25g/L 时,最大 VFA 浓度降低了 44.7%,产酸滞后 36.5h。

3.2 餐厨废弃物中油脂会促使厌氧发酵类型发生转变,相较于未添加油脂组的丁酸型发酵,添加油脂后发酵液中的丙酸所占比例提高了 3~4 倍。

3.3 各组实验发酵液中 SCOD 差异较小,表明油脂对餐厨废弃物厌氧发酵定向产酸过程的抑制主要作用在酸化阶段,而对水解阶段的作用不显著。

3.4 餐厨废弃物厌氧发酵定向产酸工程在预处理阶段应尽可能回收原料中的油脂,使处理后的餐厨废弃物油脂含量降至 5g/L 以下,可基本消除油脂对发酵产酸浓度的影响。

参考文献:

- [1] 谢伟平,梁彦杰,何德文,等.餐厨废弃物资源化技术现状及研究进展 [J]. 环境卫生工程, 2008,16(2):43-45.
- [2] Calderón Luis Alberto, Iglesias Loreto, Laca Adriana, et al. The utility of Life Cycle Assessment in the ready meal food industry [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010,54(12):1196-1207.
- [3] Dutta Suparna, Das Arabinda K. Analytical perspective on waste management for environmental remediation [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2010,29(7):636-644.
- [4] Frenkel Vs, Cummings Ga, Maillacheruvu Ky, et al. Food-Processing Wastes [J]. Water Environment Research, 2009,81(10): 1593-1605.
- [5] 王 星,王德汉,李俊飞,等.餐厨废弃物的厌氧消化技术现状分析 [J]. 中国沼气, 2006,24(2):35-39.
- [6] 张波,何晶晶,邵立明.pH 和发酵时间对厨余垃圾发酵产乳酸及光学特性的影响 [J]. 环境科学, 2007,28(4):881-885.

- [7] Kima Dong-Hoon, Kimb Sang-Hyoun, Kimc Hyun-Woo, et al. Sewage sludge addition to food waste synergistically enhances hydrogen fermentation performance [J]. *Bioresource Technology*, 2011,102(18):8501-8506.
- [8] Dai Xiaohu, Duan Nina, Dong Bin, et al. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: Stability and performance [J]. *Waste Management*, 2013,33(2):308-316.
- [9] Kim M, Gomec C Y, Ahn Y, et al. Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion [J]. *Environmental Technology*, 2003,24(9): 1183-1190.
- [10] Zhang Bo, He Pin-jing. Performance assessment of two-stage anaerobic digestion of kitchen wastes [J]. *Environmental Technology*, 35(10):1277-1285.
- [11] Chen Yi, Wen Yue, Zhou Junwei, et al. Effects of pH on the hydrolysis of lignocellulosic wastes and volatile fatty acids accumulation: The contribution of biotic and abiotic factors [J]. *Bioresource Technology*, 2012,(110):321-329.
- [12] Komemoto K, Lim Y G, Nagao N, et al. Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste [J]. *Waste Management*, 2009,29(12):2950-2955.
- [13] Oguz M T, Robinson K G, Layton A C, et al. Volatile fatty acid impacts on nitrite oxidation and carbon dioxide fixation in activated sludge [J]. *Water Research*, 2006,40(4):665-674.
- [14] Lim Seong-Jin, Chang Ho-Nam, Kim Eun-Young, et al. Biological nutrient removal with volatile fatty acids from food wastes in sequencing batch reactor [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2008,25(1):129-133.
- [15] 李梦露,蒋建国,张昊威.餐厨垃圾水解酸化液作碳源的脱氮效果研究 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(4):917-923.
- [16] Alves M M, Mota Vieira J A, Alvares Pereira R M, et al. Effect of lipids and oleic acid on biomass development in anaerobic fixed-bed reactors. Part I: biofilm growth and activity [J]. *Water Research*, 2001,35(1):255-263.
- [17] Hwu S H, Tseng S K, Yuan C Y, et al. Biosorption of long-chain fatty acids in UASB treatment process [J]. *Water Research* 1998, 32(5):1571-1579.
- [18] Li Chenxi, Champagne Pascale, Anderson Bruce C. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions [J]. *Bioresource Technology*, 2011,102(20):9471-9480.
- [19] Luste Sami, Luostarinen Sari, Sillanpää Mika. Effect of pre-treatments on hydrolysis and methane production potentials of by-products from meat-processing industry [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,164(1):247-255.
- [20] 王 权,宫常修,蒋建国,等. NaCl 对餐厨垃圾厌氧发酵产 VFA 浓度及组分的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(12):3127-3132.
- [21] 张玉静,蒋建国,王佳明. pH 值对餐厨废弃物厌氧产酸的影响 [J]. *中国给水排水*, 2013,29(1):30-33.
- [22] Jiang Jianguo, Zhang Yujing, Li Kaimin, et al. Volatile fatty acids production from food waste: Effects of pH, temperature, and organic loading rate [J]. *Bioresource Technology*, 2013,(143): 525-530.
- [23] 张玉静,蒋建国,王佳明. pH 值对餐厨废弃物厌氧发酵产挥发性脂肪酸的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(4):680-684.
- [24] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法 [M]. 4 版.北京:中国环境科学出版社, 2002: 216-219.
- [25] GB/T 11914-1989 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法 [S].
- [26] GB/T 7479-1987 水质 铵的测定 纳氏试剂比色法 [S].
- [27] Rinzema A, Boone M, Vanknippenberg K, et al. Bactericidal effect of long chain fatty acids in anaerobic digestion [J]. *Water Environmental Research*, 1994,66(1):40-49.
- [28] 任连海,聂永丰,刘建国,等.餐厨废弃物湿热处理对其脱出液的影响 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2006,46(96):1551-1554,1559.
- [29] 郭 涛,朱华伦,杜蕾蕾,等.餐厨废弃物处理中油脂和水分的去除 [J]. *粮油加工*, 2008,11:71-73.
- [30] Chen Ye, Cheng Jay J, Creamer Kurt S, et al. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 2008,99(10):4044-4064.
- [31] 任南琪.产酸发酵微生物生理生态学 [M]. 北京:科学出版社, 2005:51-62,83-87.
- [32] 王凯楠.城市生物质废物的两相厌氧消化工艺研究 [D]. 北京:清华大学, 2012.
- [33] 任南琪,赵 丹,陈晓蕾,等.厌氧生物处理丙酸产生和积累的原因及控制对策 [J]. *中国科学(B 辑)*, 2002,32(1):83-89.
- [34] Elefsiniotis P, Wareham D G. Utilization patterns of volatile fatty acids in the denitrification reaction [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007,41(1):92-97.
- [35] Jiang Jianguo, Gong Changxiu, Wang Jiaming, et al. Effects of ultrasound pre-treatment on the amount of dissolved organic matter extracted from food waste [J]. *Bioresource Technology*, 2014,(155):266-271.
- [36] GB/T 22223-2008 食品中总脂肪、饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸的测定 水解提取-气象色谱法 [S].

作者简介: 王 权(1990-),男,甘肃省庆阳市人,清华大学环境学院硕士研究生,主要从事餐厨垃圾处理处置研究。