

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.004

含油量对泔脚废油脂定向生产奇数碳 VFAs 的影响

罗 锦, 方 茜, 曾蕴仪, 韦 童
(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 奇数碳挥发性脂肪酸(OCFA)作为厌氧消化过程的中间代谢产物,是合成聚羟基烷酸(PHAs)和生物脱氮除磷(BNR)的优质碳源。为了提高 OCFA 在泔脚废油脂厌氧发酵液中的占比,研究了含油量对其厌氧发酵定向生产 OCFA 的影响。以废弃肥肉代表的脂类为发酵底物,泔水浮油和煎炸废油为添加物,厌氧池末端的剩余污泥为接种物,探讨了在含油量为 0~20 g/L 的情况下挥发性脂肪酸(VFAs)浓度和 OCFA 占比(OCFA/VFAs)的变化规律,以及对发酵过程中溶解性化学需氧量(SCOD)、溶解性蛋白质、多糖等的影响。结果表明,当含油量为 10 g/L 时,VFAs 浓度和 OCFA 最高占比均有所提高,相较于含油量为 0 g/L 时,分别提高了 57.6%、5.9%。且通过响应面法确定最佳发酵工况为发酵时间=7.6 d 和含油量=11.2 g/L,OCFA 占比最高可达 73.5%。

关键词: 含油量; 奇数碳挥发性脂肪酸; 泔脚废油脂; 厌氧发酵

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0024-08

Effect of Oil Content on Directional Production of OCFA from Hogwash Waste Grease

LUO Jin, FANG Qian, ZENG Yun-yi, WEI Tong
(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The odd carbon volatile fatty acids (OCFA), as intermediate metabolites in anaerobic digestion, are important carbon sources for the synthesis of polyhydroxyalkanoates (PHAs) and biological nutrients removal (BNR). To increase the proportion of OCFA in the anaerobic fermentation broth of hogwash waste grease, the effect of oil content in hogwash waste grease on the directional production of OCFA by anaerobic fermentation was studied. The changes of volatile fatty acid (VFAs) concentration and OCFA proportion (OCFA/VFAs) and their effects on dissolved chemical oxygen demand (SCOD), soluble protein and polysaccharides during fermentation were studied with waste fat in hogwash waste grease as fermentation substrate, slops oil slick and frying waste oil as additives, and excess sludge at the end of the anaerobic tank as inoculum. The changes of VFAs concentration and OCFA proportion (OCFA/VFAs) in the case of oil content 0~20 g/L were discussed respectively. The results showed that when the oil content was 10 g/L, the VFAs concentration and the highest proportion of OCFA were increased, compared with the oil content of 0 g/L, increased by 57.6% and 5.9% respectively. And the best fermentation conditions were determined by response surface method that fermentation time was 7.6 days, oil content was 11.2 g/L, and the highest proportion of OCFA was 73.5%.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21207023); 广东省自然科学基金资助项目(2017A030313273)
通信作者: 方茜 E-mail:gz_fq@126.com

Key words: oil content; odd carbon volatile fatty acid (OCFA); hogwash waste grease; anaerobic fermentation

奇数碳挥发性脂肪酸(OCFA)是厌氧消化过程的中间产物,主要包括丙酸、异戊酸和正戊酸,是一种碳原子个数为奇数的挥发性脂肪酸。OCFA 在污泥减量化与污水处理领域有着非常广泛的应用,是一种可再生的碳源。OCFA 不仅能够为聚羟基烷酸(PHAs)的合成提供优质的碳源,还能够决定羟戊酸酯单体在 PHAs 聚合物中的比例^[1],PHAs 中羟戊酸酯单体的比例越高,其制成的可降解生物塑料的弹性和柔韧性越好,加工性能也越优良^[2]。然而,较高的生产成本(PHAs 合成费的 40% 用于底物的开发,其中超过 70% 的费用用于碳源的投加)一直是 PHAs 合成中亟待解决的问题^[3]。利用废弃物厌氧发酵生产 OCFA,不仅能够控制 PHAs 的定向合成,还能够进一步降低 PHAs 的合成成本,并同步实现污泥减量。此外,OCFA 作为碳源投加,还能够提高生物脱氮除磷(BNR)的效率^[4]。研究人员发现,BNR 工艺的脱氮除磷效率与投加碳源的 VFAs 组成有关,即乙酸与丙酸的比例^[5]。由于丙酸有利于聚磷菌的富集,所以随着丙酸比例的增加,除磷效率也随之提高^[6]。尤其是在中国南方,如广东地区,由于雨水充沛且人均居民用水量大,使得城镇污水厂生物脱氮除磷的碳源不足,导致水处理和下游工艺的运行效果不理想,出水水质难达标。因此,利用泔脚废油脂定向生产 OCFA 工艺的提出有望使 PHAs 的合成和 BNR 工艺得到进一步优化并更好地投入实际工程和使用。

泔脚废油脂是指食品加工厂、餐饮业在生产和经营过程中产生的已经失去了食用价值的废弃油脂,主要包括煎炸废油、泔水浮油和废弃肥肉,是城市泔脚垃圾的重要组成部分^[7]。据报道,泔脚垃圾中的废油脂含量和居民食用油的消耗量有关^[8]。据不完全统计,2018 年我国的泔脚垃圾产量约为 1.1×10^8 t,若按 30% 的占比估算,其产生的泔脚废油脂可达 $3\,300 \times 10^4$ t^[9]。由于泔脚废油脂的低水溶性和易酸化腐败等特点,目前已经成为城市环境的主要污染源之一。据相关报道,未经处理的废油脂排放入下水道系统后,在下水道系统和污水处理厂的截留器中沉积,阻碍了污水的正常传输。在美国,每年大约 98% 的管道堵塞和下水道溢出是由油

脂类物质的沉积造成的^[10]。因此探索泔脚废油脂的合理处理方式迫在眉睫。利用厌氧消化技术处理泔脚废油脂,不仅能够减少泔脚废油脂排放进入管网系统,从而缓解管道系统堵塞的问题,还能够实现废弃物的减量化和能源的再利用^[11]。在研究餐厨垃圾与厌氧消化污泥的接种比的过程中,Li 等人发现以油脂类物质作为单独的厌氧消化基质的产甲烷潜力优于餐厨垃圾^[12]。曾蕴仪等在试验中分别以泔脚废油脂的不同组分作为发酵底物,研究其产酸性能,发现泔水浮油、煎炸废油和废弃肥肉三者作为发酵底物时都具有较为良好的产 OCFA 效能,其中废弃肥肉为代表的脂类是最为理想的发酵底物^[13]。由此可见,对泔脚废油脂进行厌氧发酵生产 OCFA 具有广阔的发展前景和实际工程意义。

含油量是影响餐厨垃圾厌氧发酵过程的重要因素。在其厌氧发酵过程中,较高的含油量可以提高厌氧发酵的酸化潜力,但同时也会对厌氧发酵过程产生抑制作用^[14]。笔者以废弃肥肉为发酵底物,泔水浮油和煎炸废油为添加物,探讨了在不同含油量下泔脚废油脂发酵过程中 VFAs 浓度和 OCFA 占比的变化规律以及对有机物浓度的影响。同时,结合响应面法确定泔脚废油脂厌氧发酵产 OCFA 的最佳含油量,以进一步提高其生产效率。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用材料主要源自于广州大学菊园食堂。其中,煎炸废油取自菊苑食堂煎炸间,泔水浮油与废弃肥肉取自食堂三楼的泔水桶。将取回的煎炸废油和泔水浮油静置后利用分液漏斗进行固液分离,去除固体残渣之后,收集上层浮油待用。废弃肥肉经粗提后,进行人工分选,去除瘦肉部分,并用自来水浸泡洗涤数次,以消除部分食品添加剂和其他食品杂质的影响。然后用电炉加水烧开。高温烹调时,去除直接溢出的油脂。最后用搅拌机做粉碎处理,以增加比表面积。

为了缩短发酵周期和提高酸化过程的稳定性,选择接种厌氧污泥^[15-16]。试验所用接种污泥取自广州市沥滘污水处理厂 A²/O 工艺厌氧池末端的剩余污泥,经 80 目滤网过滤去除大粒径的沙粒和部分

不溶物,静置沉淀约24 h后,排出上清液,取底层黑色的絮状污泥作为接种物,其 MLSS 为 $(15\,000 \pm 500)$ mg/L。最后,将处理后的泔脚废油脂和剩余污泥储存在4℃的冰箱中供后续使用。

食堂收集到的试验原料和厌氧污泥的性能指标如表1所示。

表1 泔脚废油脂和厌氧污泥的初始性质

Tab.1 Initial properties of hogwash waste grease and anaerobic sludge

项 目	含水率/%	TS/%	VS/%	pH 值
煎炸废油	0.29	99.71	99.59	6.03
泔水浮油	3.03	96.97	99.36	6.14
废弃肥肉	6.43	93.57	99.22	6.03
厌氧污泥	98.67	1.33	99.80	6.53

1.2 试验装置

试验装置如图1所示。反应装置选用的是水浴恒温锅(ssw-600-2s),其主要由反应装置、恒温装置、转动装置、控制装置构成。发酵瓶由石英制成,有效容积为2 000 mL,具有密封性塑料盖。塑料盖上开有两孔,一个用于取样管,另一个用于转轴。当不采样时,采样管被夹紧并保持关闭状态。发酵瓶外壁用黑色塑料袋包裹,并进行遮光处理。

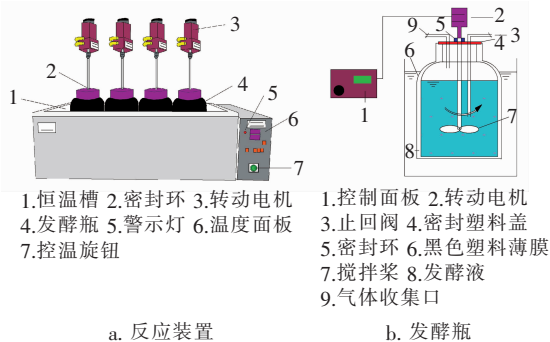


图1 反应装置和发酵瓶结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of reactor and fermentation bottle

1.3 分析方法

根据泔脚废油脂的特点和试验要求,TS、VS、SCOD的测定方法以国家环保局颁布的《水和废水监测分析方法(第4版)》为依据。蛋白质、多糖、VFAs的测定方法,通过查阅文献,选择比较成熟和精确的测量方法。其中,VS、TS:重量法,蛋白质:考马斯亮蓝 G250 染色法^[17],多糖:苯酚-硫酸法^[18],SCOD:重铬酸钾法,脂肪:酸水解法^[19],VFAs:气相色谱法^[20]。为了保证数据的可靠性,发酵周期设定为14 d,每天上午9:00取样。使用50 mL注射器,

每组取20 mL样品。在4 000 r/min下离心10 min后,取上清液测定相关指标。考虑到试验误差,设置了两组平行样,结果以平均值表示。

1.4 试验设计

采用静态批次试验。首先,精确称取50 g废弃肥肉并量取500 mL去离子水,用搅拌机充分搅拌均匀,粒径约在5 mm以下。然后,选取5个发酵瓶,在各发酵瓶中分别装入500 mL的废弃肥肉搅拌液和500 mL接种污泥[VS为 $(1.7 \pm 0.3)\%$]。最后,通过投加等质量的泔水浮油和煎炸废油以配制含油量为0、5、10、15、20 g/L的预备液。为保证严格厌氧条件,反应开始前对每个发酵瓶通入氮气吹脱10 min,后置于 (35 ± 1) ℃水浴恒温锅中。最后在120 r/min下搅拌,搅拌周期为12 h搅拌、12 h静置。预备液的性质见表2。

表2 发酵前预备液的性质

Tab.2 Properties of pre-fermentation broth

含油量/ (g · L ⁻¹)	SCOD/ (mg · L ⁻¹)	蛋白质/ (mg · L ⁻¹)	溶解性多糖/ (mg · L ⁻¹)	pH 值	VS/%
0	2 560	357.60	40.53	5.42	3.41
5	2 840	352.52	38.07	5.34	3.53
10	2 900	347.74	30.24	5.25	3.62
15	2 680	342.39	39.17	5.30	3.73
20	2 360	352.41	33.77	5.51	3.80

2 结果与讨论

2.1 含油量对酸化过程中VFAs浓度及组成的影响

2.1.1 含油量对VFAs浓度和OCFA占比的影响

酸化过程中VFAs浓度和OCFA占比变化如图2所示。各试验组的VFAs浓度都随发酵时间的增加呈现出先迅速上升后快速下降的趋势,而OCFA的占比先呈现出较快的增速,然后保持一个相对平稳的下降变化趋势。当含油量由0 g/L增加至10 g/L时,其VFAs浓度最大值分别为1 433.6、1 915.9、2 259.2 mg/L,OCFA的最高占比也由67.4%增加到73.3%。而当含油量继续增加至20 g/L时,VFAs最大浓度和OCFA的最高占比均出现下降,分别降至2 206.7 mg/L和66.0%。这说明当含油量<10 g/L时,含油量的增加有利于VFAs的生成和OCFA的累积,而当含油量>10 g/L时,含油量的增加对VFAs的生成和OCFA的累积具有一定的抑制作用。此外,含油量的增加对VFAs浓度达到最大值的时间也有影响。当含油量为0 g/L时,VFAs浓度达到最大值的时间为反应的第6天;当含

油量为 5 和 10 g/L 时, VFAs 浓度达到最大值的时间都为反应的第 5 天;然而当含油量为 15 和 20 g/L 时, VFAs 浓度达到最大值的时间却分别延长至反应的第 7 天和第 8 天,这说明含油量 < 10 g/L 时对 VFAs 浓度达到最大值的时间无较大影响;而含油量高于 10 g/L 时,对 VFAs 浓度达到最大值的时间具有滞后作用,且含油量越高, VFAs 的滞后期越长。产生这一现象的原因,一方面是因为厌氧发酵过程

中油脂的水解产物长链脂肪酸难以降解,且高浓度的长链脂肪酸容易附着于微生物的表面,影响微生物信息交换和物质转移^[21],从而减缓了发酵反应的进行。另一方面,由于油脂在水中的溶解度低且密度小于水,含油量过高,使得部分污泥被油脂包裹,引起污泥上浮,降低了污泥与其他营养物质的接触面积^[22],从而导致 VFAs 浓度达到最大值的时间有所滞后。

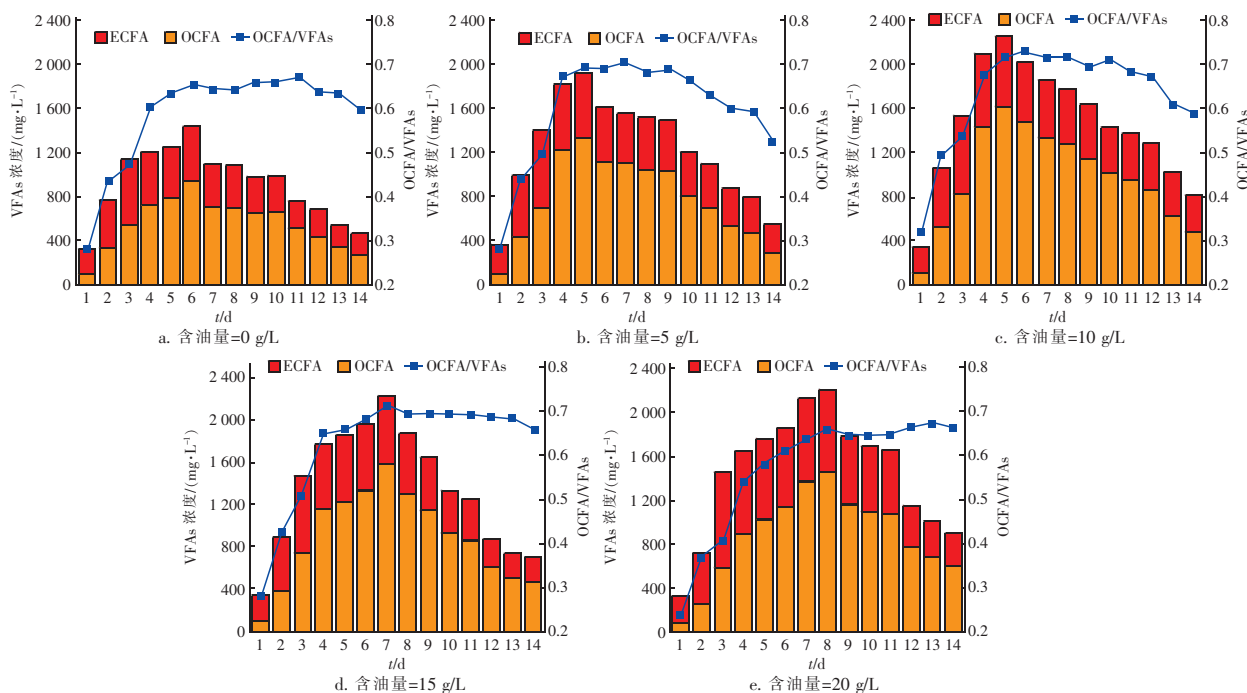


图 2 含油量对 VFAs 与 OCFA 占比的影响

Fig. 2 Effect of oil content on VFAs yield and OCFA proportion

2.1.2 含油量对 VFAs 组分的影响

选取各试验组最高 VFAs 浓度来分析泔脚废油脂发酵过程中 VFAs 组分的变化规律,结果见图 3。所检测的 VFAs 包括乙酸、丙酸、异丁酸、正丁酸、异戊酸和正戊酸。其中,丙酸含量约占 VFAs 总量的 51.4% ~ 67.5%,属于丙酸型发酵;其次为乙酸,其含量约占 25.7% ~ 33.4%;异戊酸的含量约占 2.7% ~ 12.2%;异丁酸、正丁酸和正戊酸的含量相对较低,故本研究只将其计量,并未进行深入讨论。当含油量为 0 g/L 时,丙酸含量约占 VFAs 总量的 51.4%。当含油量增加至 5 和 10 g/L 时,丙酸含量上升至 62.0% 和 67.5%,乙酸和异戊酸含量却随含油量的增加而下降。而当含油量由 10 g/L 增加至 20 g/L 时,乙酸含量由 25.7% 升至 32.7%,丙酸含量却有所下降。上述现象表明,泔脚废油脂厌氧发

酵过程中 OCFA 占比主要由丙酸含量决定。丙酸的生成与消耗是丙酸累积的重要原因,在丙酸的生成方面,油脂的水解产物甘油和长链脂肪酸,在厌氧发酵过程中被降解为丙酮酸,然后通过三羧酸循环后部分转化为丙酰辅酶 a,最后进一步转化为丙酸^[23],从而导致丙酸的累积;在丙酸的消耗方面,主要消耗 VFAs 的产甲烷阶段初期,只有在氢气分压和甲酸浓度维持在较低范围时,同型丙酸氧化菌和产甲烷菌群落才能氧化和消耗丙酸^[24]。因此,以乙酸为代表的偶数碳挥发性脂肪酸 (ECFA) 在产甲烷阶段的利用优先度会高于 OCFA。这也就是 OCFA 比例达到峰值的时间比 VFAs 达到峰值的时间晚和丙酸会成为 OCFA 主要成分的原因。当含油量过高时,容易使反应体系中的长链脂肪酸过量累积,从而导致含油量增加,OCFA 占比反而下降的现象。

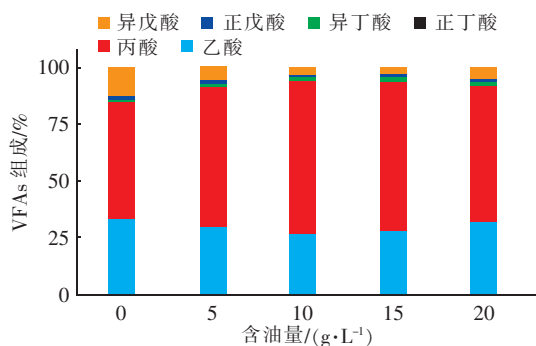


图3 最高 VFAs 浓度下的 VFAs 组分分析

Fig.3 VFAs components at the highest VFAs concentration

2.2 含油量对酸化过程中有机物浓度的影响

2.2.1 含油量对 SCOD 的影响

在厌氧发酵过程中,各种有机大分子有机物被降解为小分子有机物,在产酸菌的作用下转化为 VFAs 以及其他代谢产物,外在表现为 SCOD 的改变,因此 SCOD 是评价整个反应体系有机物变化规律的一个重要指标。如图 4 所示,各试验组的 SCOD 浓度均呈现出先快速上升,然后缓慢下降的趋势。这是由于水解阶段不溶性的大分子有机物在相关水解酶的作用下水解为微生物可利用的小分子有机物^[25],并进一步转化为 VFAs、乙醇和可溶性单糖等可溶性有机物,因此发酵反应初期 SCOD 浓度都呈现快速上升的趋势。但是随着发酵反应的进行,体系中的酸化产物迅速累积,由于负反馈机制作用酸化受到抑制,同时产甲烷阶段也需要消耗大量 VFAs 转化为甲烷等气体,故 SCOD 浓度随之下降。

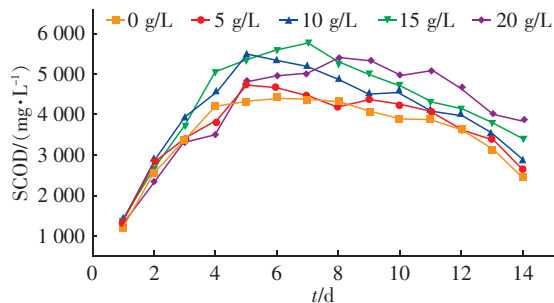


图4 含油量对 SCOD 浓度的影响

Fig.4 Effect of oil content on SCOD concentration

当含油量由 0 g/L 增加至 15 g/L 时,SCOD 浓度的最大值不断增加,最高可达 5 780 mg/L,相较于含油量为 0 g/L 时提高了 31.36%。然而,当含油量增加至 20 g/L 时,SCOD 的最大浓度出现下降。这说明,含油量低于 15 g/L 时,含油量的增加有利促

进 SCOD 的溶出;含油量高于 15 g/L 时,含油量的增加会对 SCOD 的溶出产生抑制作用。

2.2.2 含油量对脂肪浓度变化的影响

在酸性条件下,油脂水解为长链脂肪酸和甘油。甘油属于易生物降解的物质,在微生物体内经过磷酸甘油激酶的催化,先生成磷酸甘油,接着在 β -磷酸甘油脱氢酶作用下生成磷酸二羟丙酮,并最终生成 VFAs、乳酸等^[26]。长链脂肪酸的降解主要通过 β -氧化作用,最后转化为乙酸和丙酸^[27]。因此,脂肪含量的变化是评价发酵生产 OCFA 过程的重要指标。如图 5 所示,各试验组的脂肪浓度总体上均呈先下降后上升的趋势,在反应的前 7 d,脂肪浓度的变化均为负数,显示前期脂肪浓度的变化是以消耗为主,而 7 d 之后脂肪浓度变化为正数,脂肪浓度在不断上升,该阶段是以脂肪的溶出为主。当含油量为 10 g/L 时,在反应前期,脂肪含量变化速率最大为 $-10.29 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$,体现为脂肪的消耗速率,明显高于其他试验组,空白组的脂肪消耗速率最大为 $-9.30 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。这表明,在发酵反应前期含油量为 10 g/L 时,脂肪的利用和降解速率最高,油类物质的投加有利于发酵系统对脂肪的利用和降解。

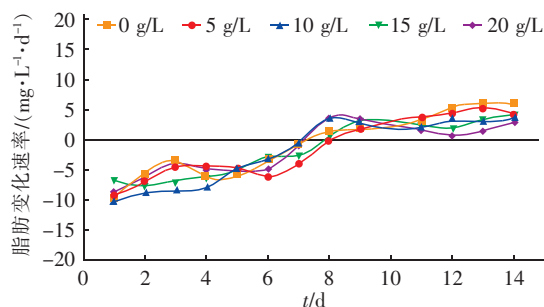


图5 含油量对脂肪浓度变化的影响

Fig.5 Effect of oil content on change of fats concentration

2.2.3 含油量对蛋白质浓度变化的影响

蛋白质作为主要的能量物质之一,是微生物生命活动不可缺少的有机物质。微生物的生长、繁殖和代谢都离不开蛋白酶的参与。蛋白质通过蛋白酶水解成肽链进入细胞,并在相关酶的作用下通过还原脱氨反应和 Stickland 途径生成丙酸和戊酸。含油量对蛋白质降解的影响如图 6 所示。在反应的前 2~4 d,蛋白质的变化速率都呈负数,且投加了泔水浮油和煎炸废油脂试验组的变化速率均大于空白组。这表明,在反应前期试验组的蛋白质降解速率大于空白组,说明油量的投加有利于提升厌氧发酵

系统对蛋白质的吸收和利用。在发酵反应的前 7 d, 含油量为 0 g/L 时, 蛋白质变化速率一直维持于较高水平, 显示蛋白质未被充分利用, 蛋白质含量不断增加且高于其他各试验组。含油量为 20 g/L 的蛋白质含量变化速率一直在较低的水平, 显示蛋白质被利用的程度高。含油量为 10 g/L 时, 蛋白质含量变化幅度大, 且在反应的第 6 天, 蛋白质变化速率为 $172.97 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$, 说明在该含油量下反应体系具有较高的蛋白质溶出和消耗能力, 为后续产酸高峰的出现提供了充足的底物。由图 2 可知, 发酵反应的前 7 d 是酸化阶段有机物消耗和 VFAs 累积的主要时期。由于 VFAs 浓度的增加, 必然需要充足的有机底物消耗, 而蛋白质含量出现较大变化幅度且呈现出动态的变化趋势。这表明 OCFA 的生成与蛋白质的降解具有较强的关联性, 含油量为 10 g/L 有利于提升发酵体系对蛋白质的利用。

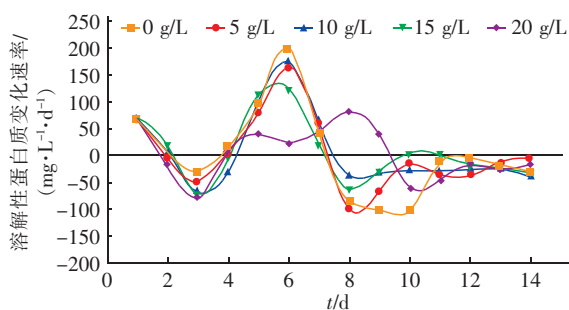


图 6 含油量对蛋白质浓度变化的影响

Fig. 6 Effect of oil content on change of protein concentration

2.2.4 含油量对溶解性多糖浓度变化的影响

多糖作为细胞和微生物体内重要的能源物质, 为细胞和微生物的生命活动提供能量。同时作为水解阶段产物的单糖类物质, 例如葡萄糖, 也能被微生物所吸收、利用, 从而提高它们的生物活性。多糖经过水解阶段分解为葡萄糖等单糖, 之后在产酸菌的作用下通过糖酵解途径产生 VFAs。如图 7 所示, 含油量为 10 g/L 时, 在反应初期的第 4 天, 溶解性多糖变化速率就高达 $12.83 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$, 而空白组的溶解性多糖变化速率最低为 $2.11 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。且溶解性多糖的变化速率, 除了在反应的前 2 d 呈现出负数, 各组在其他发酵时间均为正数, 整个发酵过程中溶解性多糖含量在前 2 d 有所降低, 而后持续增加。这说明在该泔脚废油脂发酵体系中, 多糖的溶出速率大于降解速率, 反应体系对溶解性多糖的利用程度小。由此可知, 溶解性多糖对 OCFA 的生

成贡献程度较小, 各组的多糖含量变化趋势类似, 同样说明了含油量对溶解性多糖的影响不明显。

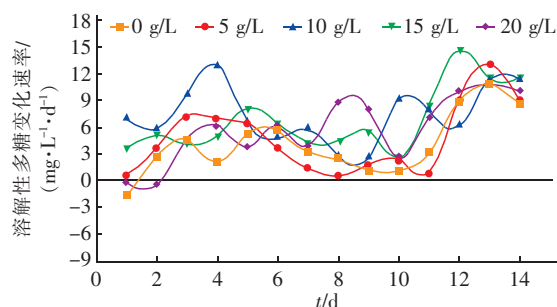


图 7 含油量对多糖浓度变化的影响

Fig. 7 Effect of oil content on change of polysaccharides concentration

2.3 泔脚废油脂产 OCFA 最佳工况的确定

为了进一步确定不同含油量下生产 OCFA 的最优工艺参数, 以 OCFA 占比 (Y) 为因变量、以发酵时间 (B) 和含油量 (A) 为自变量进行响应面分析, 结果如图 8 所示。

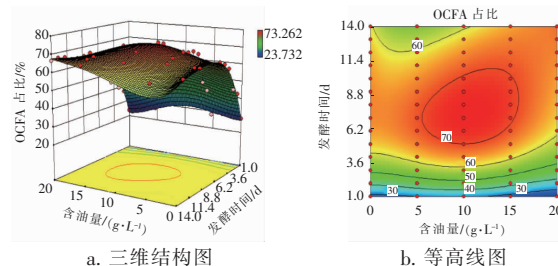


图 8 响应面的三维结构图和等高线图

Fig. 8 Response surface 3D map and contour map

试验数据经多元回归拟合, 得到按实际因素计算的最终公式及编码因子的最终公式分别如下:

$$Y_1 = 3.94 + 1.0A + 23.62B - 0.29AB + 0.18A^2 - 3.14B^2 + 0.026A^2B - 0.024A^3 + 0.18B^3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 73.43 + 3.53A - 1.51B + 7.92AB - 15.1A^2 - 20.65B^2 + 5.94A^2B - 4.39A^3 + 15.37B^3 + 7.69A^2B^2 - 4.96A^3B + 6.54A^4 - 7.53B^4 \quad (2)$$

模型 F 值为 154.2, 说明该模型具有统计学意义。同时 $P < 0.0001$, 表明该模型拟合程度达到了显著水平。基于响应面法分析, OCFA 占比的优化参数的可靠性为 95%, 最佳工艺参数为含油量 = 11.2 g/L、发酵时间 = 7.6 d。根据在 Y_2 中一阶系数绝对值的大小比较, 发现含油量的一阶系数的绝对

值大于发酵时间的。这说明含油量对 OCFA 占比的影响大于厌氧发酵时间。

3 结论

① 含油量的增加对泔脚废油脂产酸效果的影响显著。当含油量为 10 g/L 时, VFAs 浓度、OCFA 最高占比均有所增高, 相较于含油量为 0 g/L 时, 分别提高了 57.6% 和 5.9%。且其中丙酸为 OCFA 主要成分, 说明泔脚废油脂的发酵属于丙酸型发酵。

② 含油量对发酵过程中 SCOD、脂肪、溶解性蛋白质和多糖浓度均有影响, 其中对 SCOD 的影响较大, SCOD 含量最高可达 5 780 mg/L, 对溶解性多糖的浓度影响较小, 且含油量的增加有助于蛋白质和脂肪的进一步降解与利用。

③ 结合响应面法, 确定最佳发酵时间为 7.6 d、含油量为 11.2 g/L, OCFA 最高占比可达 73.5%, 且含油量对 OCFA 占比的影响大于厌氧发酵时间。

参考文献:

- [1] LEMOS P C, SERAFIM L S, REIS M A M. Synthesis of polyhydroxyalkanoates from different short-chain fatty acids by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding[J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, 122(2): 226-238.
- [2] OLIVEIRA F C, DIAS M L, CASTILHO L R, *et al.* Characterization of poly(3-hydroxybutyrate) produced by *Cupriavidus necator* in solid-state fermentation[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(3): 633-638.
- [3] GRIGORE M E, GRIGORESCU R M, IANCU L, *et al.* Methods of synthesis, properties and biomedical applications of polyhydroxyalkanoates: a review[J]. *Journal of Biomaterials Science*, 2019, 30(9): 695-712.
- [4] TONG J, CHEN Y. Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2009, 43(12): 2969-2976.
- [5] RANDALL A A, LIU Y H. Polyhydroxyalkanoates form potentially a key aspect of aerobic phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal[J]. *Water Research*, 2002, 36(14): 3473-3478.
- [6] WANG D, ZHENG W, LIAO D, *et al.* Effect of initial pH control on biological phosphorus removal induced by the aerobic/extended-idle regime[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(8): 2279-2287.
- [7] 刘栋, 韩雯, 张骁栋. 上海市虹口区废弃食用油脂处理现状及监管对策探讨[J]. *上海预防医学*, 2012, 24(3): 138-140.
LIU Dong, HAN Wen, ZHANG Xiaodong. Discussion on the present situation of waste edible oils and fats treatment in Hongkou District, Shanghai and its supervision countermeasures[J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2012, 24(3): 138-140 (in Chinese).
- [8] 冀星. 利用餐厨垃圾中的油脂生产生物柴油技术与政策问题研究[J]. *中国能源*, 2011, 33(9): 36-39.
JI Xing. Study on technology to produce bio-diesel by using grease extracted from kitchen waste and its relevant policy[J]. *Energy of China*, 2011, 33(9): 36-39 (in Chinese).
- [9] 陈婉. 餐厨垃圾处理市场走向成熟, 尚需解决老大难问题[J]. *环境经济*, 2019(17): 32-35.
CHEN Wan. The market of food-kitchen waste disposal is becoming mature[J]. *Environmental Economy*, 2019(17): 32-35 (in Chinese).
- [10] HE X, IASMIN M, DEAN L O, *et al.* Evidence for fat, oil, and grease (FOG) deposit formation mechanisms in sewer lines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(10): 4385-4391.
- [11] 柴宝华, 王怡, 王文怀, 等. 紫外诱变酵母菌利用餐饮废水油脂制取生物柴油[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(21): 113-117.
CHAI Baohua, WANG Yi, WANG Wenhui, *et al.* Biodiesel production by UV mutagenesis yeast feeding catering wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(21): 113-117 (in Chinese).
- [12] LI C, CHAMPAGNE P, ANDERSON B 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.
- [13] 曾蕴仪, 方茜, 黄周玥, 等. 不同种类泔脚废油脂厌氧发酵产酸的性能研究[J]. *应用化工*, 2020, 49(2): 326-330.
ZENG Yunyi, FANG Qian, HUANG Zhouyue, *et al.* Study on the performance of anaerobic fermentation of different kinds of hogwash waste grease[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(2): 326-330 (in Chinese).
- [14] 王权, 蒋建国, 张昊巍, 等. 油脂对餐厨废弃物单相厌氧定向制酸的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35

- (5):1436 – 1441.
- WANG Quan, JIANG Jianguo, ZHANG Haowei, *et al.* Effect of grease on acid fermentation of kitchen waste by single-phase anaerobic methods [J]. China Environmental Science, 2015, 35 (5): 1436 – 1441 (in Chinese).
- [15] 黄周玥. 泔脚废油脂产奇数碳 VFAs 的过程优化及微生物群落分析[D]. 广州:广州大学, 2019.
- HUANG Zhouyue. Process Optimization of Odd-carbon VFAs Production from Slop Waste Grease and Analysis of Microbial Community [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019 (in Chinese).
- [16] 张颖, 王怡, 柴宝华. 制取生物柴油产生的粗甘油对污泥厌氧消化的影响[J]. 中国给水排水, 2018, 34 (17): 15 – 19.
- ZHANG Ying, WANG Yi, CHAI Baohua. Effect of adding crude glycerol from biodiesel production on anaerobic digestion of excess sludge [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (17): 15 – 19 (in Chinese).
- [17] 王孝平, 邢树礼. 考马斯亮蓝法测定蛋白含量的研究 [J]. 天津化工, 2009, 23 (3): 40 – 42.
- WANG Xiaoping, XING Shuli. Determination of protein quantitation using the method of coomassie brilliant blue [J]. Tianjin Chemical Industry, 2009, 23 (3): 40 – 42 (in Chinese).
- [18] 于瑞涛, 朱鹏程, 陶燕铎, 等. 苯酚硫酸法测定迷果芹多糖的含量 [J]. 分析试验室, 2008, 27 (S2): 222 – 224.
- YU Ruitao, ZHU Pengcheng, TAO Yanduo, *et al.* Determination of polysaccharides in parsley by phenol sulfuric acid method [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2008, 27 (S2): 222 – 224 (in Chinese).
- [19] 魏永义, 郭明月, 张莉, 等. 酸水解法测定火腿肠中的脂肪 [J]. 肉类工业, 2010 (9): 21 – 22.
- WEI Yongyi, GUO Mingyue, ZHANG Li, *et al.* Determination of fat content in ham sausage by acid hydrolysis method [J]. Meat Industry, 2010 (9): 21 – 22 (in Chinese).
- [20] 刘艳玲, 任南琪, 刘敏, 等. 气相色谱法分析厌氧反应器中的挥发性脂肪酸 (VFA) [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33 (6): 31 – 34.
- LIU Yanling, REN Nanqi, LIU Min, *et al.* Analysis of volatile fatty acid (VFA) in anaerobic bio-reactor by gas chromatography [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33 (6): 31 – 34 (in Chinese).
- [21] PEREIRA M A, PIRES O C, MOTA M, *et al.* Anaerobic biodegradation of oleic and palmitic acids: evidence of mass transfer limitations caused by long chain fatty acid accumulation onto the anaerobic sludge [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, 92 (1): 15 – 23.
- [22] 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 grease on anaerobic digestion of sludge and kitchen waste [J]. Industrial Safety and Dust Control, 2018, 44 (5): 95 – 98 (in Chinese).
- [23] DIPOPOULOU G, RUDD T, LESTER J N. Anaerobic acidogenesis of a complex wastewater: I. The influence of operational parameters on reactor performance [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1988, 31 (9): 958 – 968.
- [24] MOHAMMED A R, WESTON N, COOMBES A G, *et al.* Liposome formulation of poorly water soluble drugs: optimisation of drug loading and ESEM analysis of stability [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2004, 285 (1/2): 23 – 34.
- [25] 刘柯君. 慢速可生物降解有机物转化特性及利用潜力分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- LIU Kejun. Conversion and Utilization of Slowly Biodegradable Organic Matter [D]. Xi ' an: Xi ' an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese).
- [26] YANG G, WANG D, YANG Q, *et al.* Effect of acetate to glycerol ratio on enhanced biological phosphorus removal [J]. Chemosphere, 2018, 196: 78 – 86.
- [27] KIM S H, HAN S K, SHIN H S. Kinetics of LCFA inhibition on acetoclastic methanogenesis, propionate degradation and beta-oxidation [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2004, 39 (4): 1025 – 1037.

作者简介: 罗锦 (1995 –) , 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理和固体废弃物资源化利用。

E – mail: 1205997151@ qq. com

收稿日期: 2020 – 09 – 03

修回日期: 2020 – 09 – 21

(编辑: 李德强)