

食品废弃物风干处理后厌氧消化特性研究^{*}

王延昌 袁巧霞 谢景欢 郭聪颖

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

【摘要】 为了抑制食品废弃物厌氧发酵过程中产酸速度,采用食品废弃物风干预处理方法,研究高温条件下不同接种率和含水率对风干食品废弃物厌氧消化过程的影响。研究表明:风干处理能有效缓解酸化初期的酸中毒现象;含水率和接种率的交互作用明显影响风干食品废弃物产气率和污染物去除率;在高接种率时,低含水率的系统更有利于风干食品废弃物的处理,处理后的系统有较高的缓冲能力;在55%接种率、92%含水率条件下能实现风干食品废弃物厌氧发酵的顺利进行,且单位可挥发性固体风干食品废弃物的产 CH_4 率达到了0.246 L/g,而最大的产 CH_4 率在接种率为75%、含水率为88%条件下获得,为0.471 L/g,且在产气稳定时期,气体中 CH_4 体积分数维持在75%左右;COD的去除率以及TS的去除率都随接种率的提高而上升,最高的COD去除率为91.6%,最高的TS去除率为32.7%。

关键词: 食品废弃物 厌氧发酵 接种率 含水率 风干

中图分类号: X705; TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0105-05

Anaerobic Digestion Characteristics for Air-dried Food Waste

Wang Yanchang Yuan Qiaoxia Xie Jinghuan Guo Congying

(College of Engineering and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract

Under high temperature condition, the effects of inoculation rates and moisture contents on anaerobic digestion of air-dried food waste were studied. The results showed that air-dried food waste could effectively alleviate the acidosis at the initial acidification phase. The interaction of inoculation rates and moisture contents makes an impact on the methane production. High inoculation rate and low moisture content is advantage to anaerobic digestion of air-dried food waste which gives the system a higher buffer capacity. When the inoculation rate is 55% and the moisture content is 92%, the process of anaerobic digestion operates normally with the methane production rate of 0.246 L/g. The highest methane production rate reaches to 0.471 L/g at 75% inoculation rate and 88% moisture content. The removal rates of COD and TS increase with inoculation rate, and the highest is 91.6% and 32.7%, respectively.

Key words Food waste, Anaerobic fermentation, Inoculation rate, Moisture content, Air-drying

引言

我国是人口大国,随着社会经济发展,城市居民生活水平的提高,食品废弃物的产生量与环境安全影响已成为人们关注的焦点。据有关统计,我国的食品废弃物年产量在2000年就达到了4500万 $\text{t}^{[1]}$ 。

近年来,由于人们生活水平的提高,餐饮业的连锁扩张步伐加快,出现了许多具有一定规模化经营的连锁餐饮企业,与之相伴随的餐饮有机垃圾也在逐年上升。

厌氧发酵处理食品废弃物由于能实现能源的回收,具有较大的经济价值,且可以杀死传染性病原

菌,有利于防疫等优点,被认为是一种具有可持续发展意义的技术,并已成为国内外相关专家研究的焦点^[2-7]。由于食品废弃物产酸速度快、产酸量大,使其厌氧发酵难以顺利进行,针对这种状况,钱小青对食品废弃物进行风干处理,发现风干食品废弃物初期的产酸速率和产酸量与新鲜食品废弃物相比均有所下降,表现出明显的产酸“缓释性”^[8]。为了探讨一条适合于餐饮现场垃圾资源化利用工艺技术路线,本文采用食品废弃物风干预处理方法,研究高温条件下不同接种率和含水率对风干食品废弃物厌氧消化过程的影响。

表1 食品废弃物基本特性(质量分数)

Tab.1 Basic characteristics of air-dried food waste

%

废弃物类型	总固体(TS)	挥发性固体(VS)	灰分	总磷(TP)	总钾(TK)	总碳(TOC)	总凯氏氮(TKN)	碳氮比(C/N)
新鲜食品废弃物	25.98	91.23	8.77	0.50	1.10	42.88	2.03	21.12
风干食品废弃物	88.22	90.32	9.68	0.51	1.08	42.45	1.97	21.54

1.2 试验装置

试验装置如图1所示,由500 mL抽滤瓶、500 mL和1 L的盛水瓶、水浴锅、量筒组成。抽滤瓶作为发酵瓶,产生的气体经玻璃导管到集气瓶内,采用排水法测定发酵产生的气体,当集气瓶内的水被排空时,关闭阀a,打开阀c、b,阀b接Gasboard-3020P型气体分析仪测定气体成分,测定完毕关闭阀c、b,打开阀a。

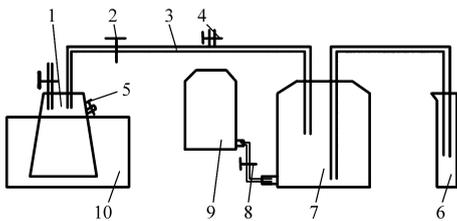


图1 试验装置图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

1. 抽滤瓶 2. 阀门a 3. 玻璃导管 4. 阀门b 5. 止水夹 6. 量筒 7. 集气瓶 8. 阀门c 9. 盛水瓶 10. 水浴锅

1.3 方法

(1) 试验设计

试验考虑接种率和含水率因素,在温度为55℃的高温环境以及搅拌一致条件下,分别采用55%、65%、75% 3个水平的接种率和84%、88%、92% 3个水平的含水率,通过单因素试验探讨不同接种率和含水率对食品废弃物厌氧发酵过程的影响。

(2) 测试方法

甲烷采用Gasboard-3020P型气体分析仪测定;总固体(TS)和挥发性固体(VS)分别采用烘干法和

1 试验材料与与方法

1.1 材料

试验所用食品废弃物分别从华中农业大学学生食堂及国际交流中心收集,主要成分包括米饭、蔬菜、肉类、骨头、面食等,含盐分和油脂,不含花椒粉、芥末油等成分。将分别收集的样品沥干控去部分油水,并按1:1均匀混合后再进行风干处理。样品风干前后的理化特性如表1所示。试验所用接种污泥是将养猪场厌氧发酵池污泥经20 d驯化处理所得^[9]。

灼烧法测定^[10],污泥产气活性采用最大产CH₄速率法计算^[11]。pH值用pHB-4型数字式酸度计进行测定。总碳(TOC)大约为有机质的47%^[12],可通过测定其挥发性固体质量,再乘以0.47得出。总凯氏氮(TKN)采用H₂SO₄-水杨酸-混合盐消煮^[13],用FLAStar 5000型流动注射仪进行测定。总磷(TP)采用H₂SO₄-HNO₃消煮-钒钼黄比色法测定^[13]。总钾(TK)采用H₂SO₄-HNO₃消解-火焰光度法测定^[13]。COD采用CM-03型便携式COD测定仪进行测定。总挥发性脂肪酸(VFA)采用比色测定法测定^[11]。碱度采用以溴甲酚绿-甲基红为指示剂的滴定法测定^[11]。

2 结果与分析

2.1 pH值和VFA变化

图2为风干食品废弃物在厌氧发酵过程中pH值和VFA的变化。从图2中可以看出,随着接种率的提高,pH值都以较高的水平运行,这就意味着系统内部环境非常适合产甲烷菌的生长。从整个系统运行状况来看,pH值的最低值大都出现在第3天前,即产气高峰值来临之前一段时间,这主要是由于VFA的大量积累为甲烷菌提供了充足的底物,促进了甲烷菌的生长,致使随后的产气量增加。当大量VFA被用于产气以后,再加上系统内碱度的上升对酸的缓冲作用,系统的pH值随之升高。

从图2还可以看出,pH值的最低点与VFA的最高点并不是同时出现的,pH值达到最低点的时间总体上要比VFA含量(质量分数)达到最高点的时间提前2~3 d。研究发现,在试验初期产酸菌就已

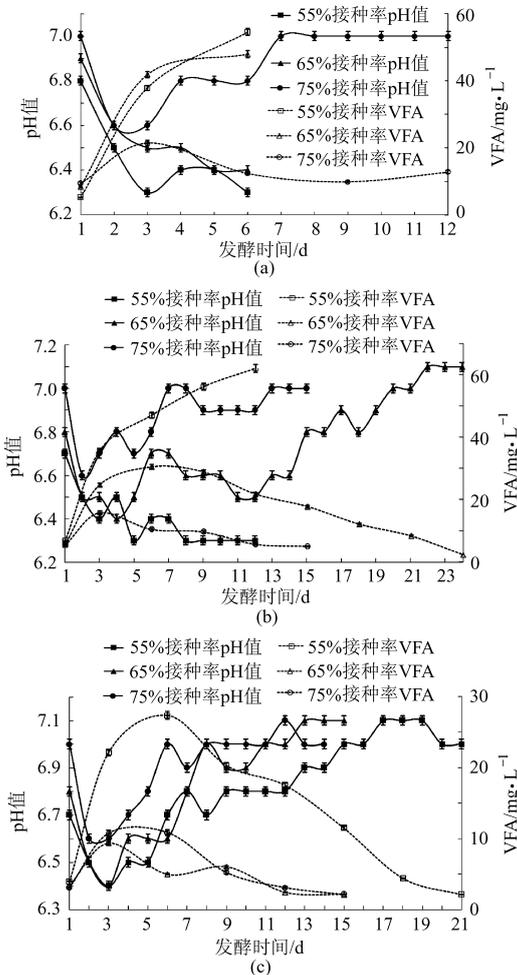


图 2 不同接种率的 pH 值和 VFA 变化曲线
Fig. 2 Changes of pH and VFA under different inoculations rates

(a) 含水率 84% (b) 含水率 88% (c) 含水率 92%

经开始大量活动使系统的 VFA 含量不断升高,但此时产甲烷菌的活性还没有恢复,无法消耗系统的 VFA,因此试验初期系统的 pH 值会快速下降;随着试验的进行,产甲烷菌开始活动,消耗 VFA 并生成 CO_2 、 NH_3 等碱性缓冲物质,使得系统碱度升高,pH 值也随之逐渐升高;之后虽然系统的 VFA 含量很高,但由于碱性物质的缓冲作用使得系统的 pH 值能保持相对稳定。

pH 值是厌氧消化过程中一个重要的控制参数,它的大小及其稳定性对产气效果有很大影响,对厌氧消化过程中的最佳 pH 值进行预测并有效控制至关重要。因此在单相系统中如何控制条件提高 VFA 在水解酸化产物中的分配比例是提高厌氧消化过程处理食品废弃物效率的关键。在 84% 含水率条件下,由于系统固体含量较高,致使 55% 和 65% 接种率的系统瘫痪。很多试验也已经证明了高固含率极易造成系统瘫痪,在保证较高的处理效率情况下,选择较低的固含率可以有效避免系统的酸

化。而 75% 接种率条件下的系统能够正常运行,可能是因为在这样的条件下,刚好达到最适宜的接种物浓度,保证了厌氧发酵系统的启动。

2.2 产气率变化

在整个试验过程中,前 2~3 d 内迅速产生大量的气体,这主要是由于可溶解的底物迅速被降解而产生大量气体,但气体含 CH_4 量较少(图 3),气体中 CH_4 量基本在第 4 天前后达到最大值,以后趋于稳定,稳定后 CH_4 体积分数在 62%~80% 之间,这与 Cho 和 Park 的研究^[14] 相符。许多研究证明^[3,15],接种物数量和温度与沼气中 CH_4 量之间有着一定的联系,中温条件下的甲烷量要稍高于高温条件。

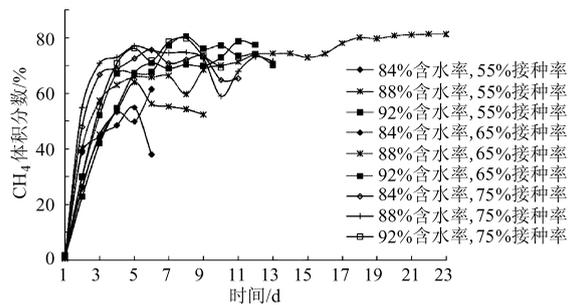


图 3 厌氧发酵过程中 CH_4 变化曲线

Fig. 3 The methane content of biogas production under different conditions

图 4 表示了不同接种率和含水率条件下的产气率的变化曲线,由图中可得,接种率为 75%,含水率为 88% 条件的产气率最大,达到 0.471 L/g。同时随着接种率提高,单位固体食品废弃物产气率显著增加,55% 接种率条件下最低的产气率是 0.013 L/g,最高的为 0.246 L/g,平均为 0.095 L/g。在 92% 含水率条件下产气率最高,远高于其他 2 个水平的含水率,这主要是由于系统得到了较好的缓冲,而另外两个水平由于系统内 VFA 积累严重,导致瘫痪。

65% 接种率条件下最低的产气率为 0.024 L/g,最高为 0.415 L/g,平均 0.269 L/g,是 55% 接种率条件下平均产气率的 2.78 倍。同时随着含水率增加,

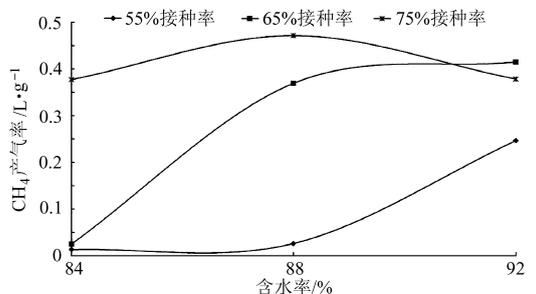


图 4 不同接种率、不同含水率的产气率变化

Fig. 4 Change of methane production rates under different inoculations rates and moisture content

产气率也逐渐上升。

75%接种率条件下最低产气率为0.377 L/g,最高为0.471 L/g,平均0.409 L/g,比65%接种率的平均值提高了1.5倍。在此条件下,产气率随含水率的增加无大幅度变化,在88%含水率条件下得到最大产气率,这既证明了接种率与含水率之间的交互作用,也说明接种率并不是越大越好,而应选择适当的接种率和含水率。

2.3 污染物去除率变化

污染物去除率的变化如图5~8所示。由图5、8可以看出,随着接种率提高,COD去除率以及TS去除率都随之上升,最高的COD去除率为91.6%,最高的TS去除率为32.7%。在75%接种率条件下,COD的去除率平均为89.2%,去除率较高,且反应后物料的COD值都在3000 mg/L以下。由图6得,反应前后系统中总氮量有明显提高,说明风干后的食品废弃物在厌氧反应中,微生物对氮源需求较少。

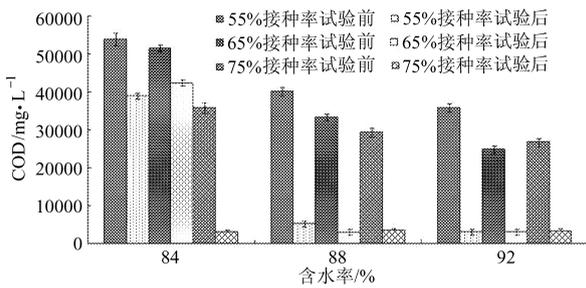


图5 COD变化

Fig. 5 Changes of COD

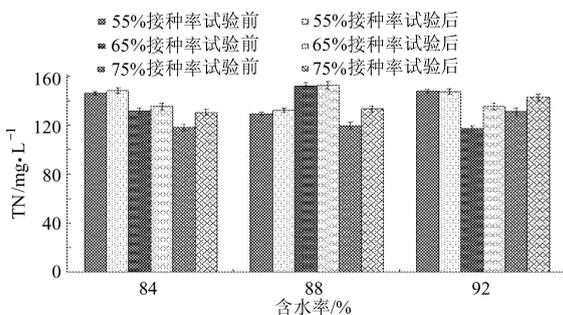


图6 TN的变化

Fig. 6 Changes of total nitrogen

从图7中可看出,系统在75%接种率条件下,反应后的碱度都提高了60%以上,这与高接种率系统内有大量的微生物细菌和系统内大量积累的VFA被微生物分解生成碱性物质有关。在84%含水率条件时,只有75%接种率系统的碱度升高,其他2个水平几乎无变化,主要是由于系统TS较高,而接种率低,导致系统启动失败所致。

另外在55%接种率、92%含水率条件下系统运行正常,且COD去除率、产气率、TS去除率效果都

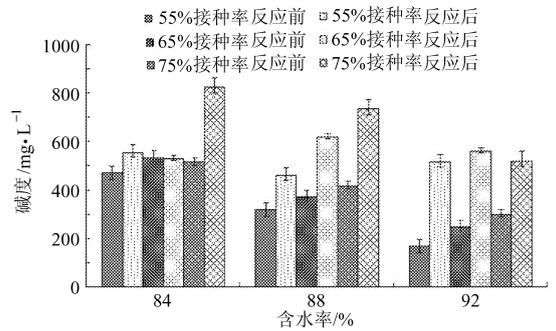


图7 碱度的变化

Fig. 7 Changes of alkalinity

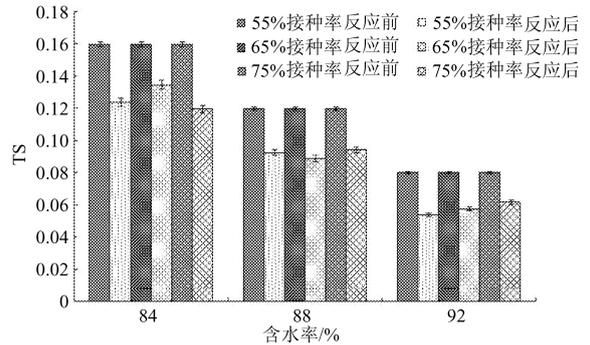


图8 TS的变化

Fig. 8 Changes of TS

较好,足以证明含水率较高条件下,较低的接种率也可取得较好的试验结果,因试验是在实验室规模下进行,未进行扩大规模的试验研究,因此需做进一步的验证试验。

3 结束语

试验证明,对风干食品废弃物通过厌氧发酵实现甲烷化是可行的,接种率和含水率是影响厌氧发酵的主要因素。在高接种率时,高固体含量的系统更有利于风干食品废弃物的处理,处理后的系统有较高的缓冲能力。在55%接种率、92%含水率条件下能实现风干食品废弃物厌氧发酵的顺利进行,且单位固体风干食品废弃物的产气率达到0.246 L/g。而最大的产气率在接种率为75%、含水率为88%条件下获得,为0.471 L/g,且在产气稳定时期,气体中所含CH₄体积分数维持在75%左右。

含水率也是影响产气效果关键的因素。叶诗瑛研究了高温条件下固体含量对城市有机垃圾厌氧消化的影响,当固体质量分数大于20%时,系统pH值迅速下降,导致系统瘫痪^[16]。Lay研究了不同基质含水率的极限值,在极限值时产甲烷活力降为零;其中污泥的极值为56.5%,当污泥含水率从96%下降到90%时,产甲烷活力从100%下降到53%;而肉、萝卜和甘蓝产甲烷的含水率极限值大于80%^[17]。产气率亦是随含水率的增加而升高。含水率越高,

在系统反应初期酸的迅速积累现象就会得到有效地缓解,从而使系统能够顺利地启动并达到快速产气的状态。含水率同时也约束着系统内部微生物菌群的活动,由于食品废弃物含淀粉类物质较多,利于乳酸菌生长,因此本身会带有乳酸菌及其他大量微生物。在含水率低的情况下,由于产酸菌活动频繁,繁殖速度快,使得供需矛盾突出,容易出现酸化问题,影响系统的整体产气。

无论是接种率还是含水率都对风干食品废弃物厌氧消化系统的酸化问题起着重要作用。Szanto等发现在厌氧发酵启动阶段通过增加接种物量可以克

服不可逆的酸化问题^[18]。结果也表明:随着接种率的增大,累积产气量增加。但并不是说接种率越大越好,随着接种率的增大,容易造成微生物处于饥饿状态,反而降低了消化效率,影响产气,系统产气波动较大。

食品废弃物风干处理有利于污染物的减量排放,其COD去除率以及TS去除率都随接种率提高而上升,最高的COD去除率为91.6%,最高的TS去除率为32.7%。但接种率过高会增加设备投资,在实际生产中,可根据产气情况及污染物去除状况进行综合考虑。

参 考 文 献

- 1 王华.二噁英零排放化—城市生活垃圾焚烧技术[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- 2 Zhang R H, Hamed El-Mashad M, Karl H, et al. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(4): 929 ~ 935.
- 3 Wilton Silva Lopes, Valderi Duarte Leite, Shiva Prasad. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94(3): 261 ~ 266.
- 4 Shin H S, Han S K, Song Y C, et al. Performance of UASB reactor treating leachate from acidogenic fermenter in the two-phase anaerobic digestion of food waste[J]. *Water Research*, 2001, 35(14): 3441 ~ 3447.
- 5 王星,王德汉,马磊.膨润土的添加用量对食品废弃物厌氧消化过程的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 330 ~ 334.
Wang Xing, Wang Dehan, Ma Lei. Influence of bentonite dosages on anaerobic digestion of food waste[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 330 ~ 334. (in Chinese)
- 6 吕凡,何品晶,邵立明,等.餐厨垃圾高温好氧生物消化工艺控制条件优化[J]. *同济大学学报*, 2003, 31(2): 233 ~ 238.
Lü Fan, He Pinjing, Shao Liming, et al. Optimum operation parameters of aerobic thermophilic process for food wastes[J]. *Journal of Tongji University*, 2003, 31(2): 233 ~ 238. (in Chinese)
- 7 刘荣厚,王远远,孙辰.温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 116 ~ 121.
Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9): 116 ~ 121. (in Chinese)
- 8 钱小青.泔脚废物厌氧两相发酵工艺及其矿化垃圾协同生物产气过程研究[D].上海:同济大学,2006.
Qian Xiaoqing. Anaerobic digestion and biological hydrogen production from food origin wastes in the presence of aged refuse [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- 9 王延昌.餐厨垃圾分散式现场处理关键技术研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
Wang Yanchang. Study on key technologies for decentralization treatment of food waste on-site [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 10 贺延龄.废水的厌氧生物处理[M].北京:中国轻工业出版社,1998.
- 11 任南琪,王爱杰.厌氧生物技术原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- 12 李国刚.固体废物试验与检测分析方法[M].北京:化学工业出版社,2003.
- 13 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000.
- 14 Cho J K, Park S C. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 52(3): 245 ~ 253.
- 15 Song Y C, Kwon S J, Woo J H. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic and thermophilic digestion of sewage sludge[J]. *Water Research*, 2004, 38(7): 1653 ~ 1662.
- 16 叶诗瑛.城市有机垃圾厌氧消化工艺条件研究[D].合肥:合肥工业大学,2007.
Ye Shiying. Research on anaerobic digestion conditions of municipal organic waste [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 17 Lay J J, Li Y Y, Noike T, et al. Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(6 ~ 7): 493 ~ 500.
- 18 Szanto G L, Hamelers H V M, Rulkens W H, et al. NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14): 2659 ~ 2670.