



移动扫码阅读

万志刚,黄召亮,乔杰,等. 蔬菜废弃物高温厌氧消化失稳预警研究[J].能源环境保护,2021,35(4):27-33.
WAN Zhigang, HUANG Zhaoliang, QIAO Jie, et al. Study on the early warning for instability of the thermophilic anaerobic digestion of vegetable waste[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(4): 27-33.

蔬菜废弃物高温厌氧消化失稳预警研究

万志刚¹,黄召亮¹,乔杰¹,张俊²,敖天杰³,李东³

(1.东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000;2.德阳市固体废物处置有限公司,四川 德阳 618000;
3.中国科学院成都生物研究所,四川 成都 610041)

摘要:为提高蔬菜废弃物发酵系统效率并促进其在高有机负荷条件下稳定运行,在高温(55℃)条件下进行蔬菜废弃物连续式厌氧发酵试验,筛选了厌氧发酵系统的失稳预警指标。结果表明:碳酸氢盐碱度(BA)失稳预警性能最强,可提前23 d预警,当BA<1 500 mg/L时,系统出现失稳迹象;乙酸及正丁酸分别提前22 d、21 d预警;甲烷/二氧化碳(CH₄/CO₂)可以提前21 d预警,当CH₄/CO₂<1.23时,系统出现酸化;总挥发酸/碳酸氢盐碱度(VFA/BA)、碳酸氢盐碱度/总碱度(BA/TA)、挥发酸盐碱度/碳酸氢盐碱度(IA/BA)均可以提前16 d预警,其预警临界值分别为VFA/BA>1.8、BA/TA<0.5、IA/BA>1.2;pH和氧化还原电位(ORP)的预警性较差,预警天数不足10 d。

关键词:蔬菜废弃物;高温厌氧消化;失稳预警

中图分类号:X712

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)04-0027-07

Study on the early warning for instability of the thermophilic anaerobic digestion of vegetable waste

WAN Zhigang¹, HUANG Zhaoliang¹, QIAO Jie¹, ZHANG Jun², AO Tianjie³, LI Dong³

(1. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China; 2. Deyang Solid Waste Services Co., Ltd., Deyang 618000, China; 3. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of a vegetable waste fermentation system and promote its stable operation under high organic load, the continuous anaerobic fermentation experiment of vegetable waste was carried out under the high temperature of 55 °C. The indexes of early warning for instability of the anaerobic fermentation system were determined. The results showed that the instability early warning performance of bicarbonate alkalinity (BA) was strongest, and its early warning could be given 23 days in advance. When the concentration of BA was less than 1 500 mg/L, the system showed signs of instability. The early warning of acetic acid and n-butyrac acid was given 22 days and 21 days in advance, respectively. CH₄/CO₂ could give early warning 21 days in advance. When CH₄/CO₂<1.23, acidification appeared in the system. The total volatile fatty acid/bicarbonate alkalinity (VFA/BA), bicarbonate alkalinity/total alkalinity (BA/TA) and intermediate alkalinity/bicarbonate alkalinity (IA/BA) could give early warning 16 days in advance. The critical values of early warning were VFA/BA>1.8, BA/TA<0.5, and IA/BA>1.2, respectively. The early warning performance of pH and oxidation reduction potential (ORP) was poor, and their warning days were less than 10 days.

Key Words: Vegetable waste; Thermophilic anaerobic digestion; Early warning for instability

收稿日期:2021-05-14;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:四川省科技成果转化示范项目(2021ZHYZ0016, 2020ZHYZ0008)

第一作者简介:万志刚(1985-),男,贵州铜仁人,工程师,主要研究方向为生活垃圾及污水处理技术与项目管理。E-mail:yunwzg@163.com

通讯作者简介:李东(1982-),男,云南玉溪人,研究员,主要研究方向为城乡有机废弃物资源化利用。E-mail:lidong@cib.ac.cn

0 引言

据国际粮农组织统计数据(FAOSTAT),中国蔬菜产量居世界第一位,占世界总产量的49%。在日常生活和农业生产过程中,会产生大量的蔬菜废弃物,我国每年产生的蔬菜废弃物高达1亿吨,我国城市生活垃圾20%~50%来自于新鲜的果蔬废弃物^[1]。随着农村产业结构的调整,蔬菜作物的种植量在农作物中所占的比重降越来越大^[2]。蔬菜废弃物含有大量水分及可降解的有机物,其营养成分高且无毒害性。针对此类废弃物,快速、有效的处理方法尤为重要。在能源与环境问题日益突出的背景下,将蔬菜废弃物中的生物质能再次利用显得非常重要^[3-4]。厌氧消化技术是最重要的生物质能利用技术之一,其可将有机废弃物中的生物质转化成沼气,以实现资源和能源的回收利用^[5-6]。因此,利用厌氧发酵技术处理蔬菜废弃物是减少环境污染、回收其内部清洁能源的最佳技术途径之一,也是促进我国发展低碳循环经济,实施节能减排战略的迫切需要^[7]。

近年来,我国大力推行餐厨垃圾、果蔬垃圾等高有机质垃圾资源化处理工程建设,但高负荷运行的厌氧消化系统中,由于水解酸化与产甲烷两个过程不能较好地匹配,极易引起酸化产物的积累,从而抑制产甲烷菌群,最终导致厌氧系统失稳^[8]。因此,现有工程一般是在低负荷条件下运行,但较低的负荷虽然能够保证沼气发酵系统的

稳定,却无法兼顾效率,造成反应器体积资源的浪费,使得工程整体经济性较差^[9]。同时,蔬菜废弃物是一种极易腐原料,在厌氧消化过程中容易出现酸化,进而抑制产气,这也限制了以蔬菜废弃物为原料的商业化集中处理设施的有效运行。

为了提高蔬菜废弃物发酵系统的效率,使其在高有机负荷条件下稳定运行,对厌氧系统的酸化预警及调控研究十分重要。针对蔬菜废弃物易酸化的特点,本研究开展高温条件下连续式厌氧发酵试验,通过对各个指标的跟踪监测和变化规律分析,筛选出高温条件下蔬菜废弃物厌氧发酵系统的失稳预警指标,为蔬菜废弃物高温厌氧处理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 发酵原料与接种液

蔬菜废弃物取自成都海吉星物流中心蔬菜交易区市场,对不同种类的蔬菜废弃物进行粉碎至浆状。粉碎后对样品进行充分搅拌,使物料能够均匀混合。制样完毕后,将样品放入50 L塑料桶内,在冰柜进行低温(4℃)冷藏保存,其基本性质如表1。高温接种液取自双流县沼气基地沼气池的厌氧污泥,取回后将其接种进发酵罐进行驯化,驯化期间每天向罐中投加0.5 g(以VS计)/(L·d)的蔬菜废弃物并每天监测所产生的沼气中甲烷的含量,当沼气中的甲烷含量持续大于60%时可以认为驯化成功。

表1 蔬菜废弃物理化性质

Table 1 The characteristics of vegetable wastes

原料	固体含量 /%	挥发性固 体含量/%	氨氮 /(mg·L ⁻¹)	总碳 /%干基	总氮 /%干基	C/N	碳水化合物 /%干基	粗纤维 /%干基	粗脂肪 /%干基	粗蛋白 /%干基
蔬菜废弃物	10.57	9.73	0.20	44.5	2.64	17.10	73.63	11.90	3.44	13.20

1.2 试验装置与运行

试验装置由发酵罐、气体成分自动监测仪、仪表柜三部分组成。发酵罐总体积70 L,有效体积55 L,顶部配有搅拌电机,每天搅拌8次,每次30 min,转速控制在40 r/min。反应器外部设有加热装置,以控制反应器内部的温度为55℃,出料口采用阀门控制,设在反应器底部,排气口采用阀门控制,设在反应器壁上。试验反应装置如图1所示。

研究采用高温55℃连续式运行,其水力停留时间(HRT)为20天,每个试验周期运行时间为30天,有机负荷率(OLR)及运行条件如表2所示。

每天定时定量地向反应器内投加原料,同时从出样口排出等量的沼液。每天在线监测发酵罐内产气规律及沼液各项指标情况,主要包括气体产量、气体成分、pH及ORP。同时,每天对排出沼液的挥发性脂肪酸(VFA)、碱度、氨氮进行跟踪监测。通过指标的变化规律,分析蔬菜废弃物单相厌氧消化系统失稳的原因,构建失稳预警体系。

1.3 指标监测方法

总固体(TS)采用烘干法,挥发性固体(VS)的质量分数采用称重法^[10];C,N的质量分数采用元素分析仪测定;粗蛋白,粗纤维和粗脂肪采用国标法(GB/T 2009—2003)测定;产气量和气体成分由

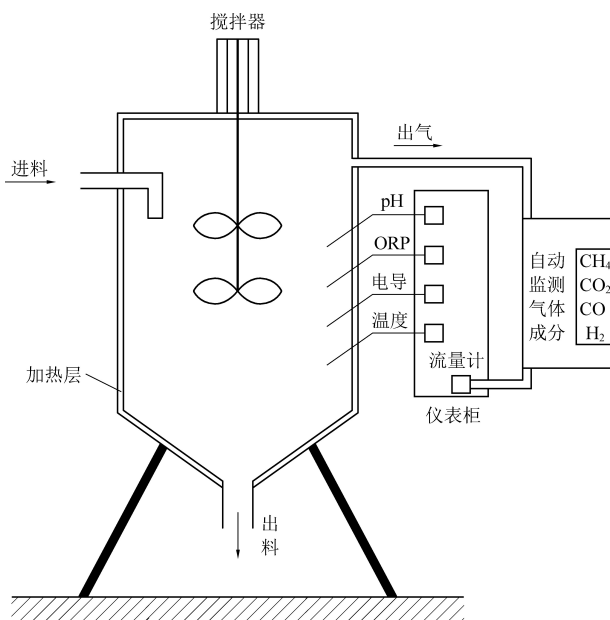


图 1 反应装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the reactor

表 2 试验运行条件

Table 2 Operating conditions of the experiment

运行周期	有机负荷率/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	水力停留时间/d	运行时间/d
1	0.5	20	30
2	1.0	20	30
3	1.5	20	30
4	2.0	20	30
5	2.5	20	30

七星电子气体质量流量计和四方光电 GAS-BOARD—3100 沼气分析仪自动监测,发酵液的 pH、ORP、电导率在线监测。对于液相末端产物,采样后离心 15 min,转速 4 800 r/min,取上清液测定氨氮,碱度和挥发性脂肪酸;氨氮采用纳式试剂法测定;碱度采用雷磁 ZDJ-4B 自动电位滴定仪测定,包括总碱度(TA)、碳酸氢盐碱度(BA)和挥发性脂肪酸碱度(IA),TA 滴定终点为 $\text{pH} = 3.70$, BA 滴定终点为 $\text{pH} = 5.75$, IA 滴定终点为 $\text{pH} = 4.30$;挥发性脂肪酸采用 Agilent 6890N 气相色谱分析,主要分析乙酸、丙酸、正异丁酸和正异戊酸浓度。

2 结果与分析

2.1 试验产气状况分析

厌氧消化失稳预警指标要求具备三个特性:显著的单向变化,较长的预警天数和显著的变化(或突变),其中预警天数指彻底停止产甲烷的时间减去指标突变时的时间。图 2 为池容产甲烷率(VMPR)和 CH_4/CO_2 的变化。反应器启动阶段,

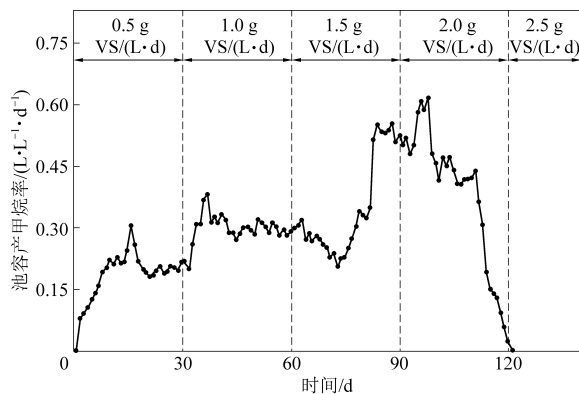
随着加料的持续进行,池容产气率缓慢增加。在有机负荷率为 $0.5 \sim 1.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 阶段,最大池容产甲烷率分别为 $0.3 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 和 $0.37 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$;当有机负荷率增加至 $1.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时,池容产甲烷率在第 84 d 迅速增大至 $0.53 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$;当负荷量为 $2.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时,发酵 98 d,最大池容产甲烷率为 $0.6 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。随着试验的进行,第 99~110 d 池容产甲烷率从 $0.46 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 降低至 $0.4 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$,可能是系统内的微生物开始受到抑制作用,此时系统进入轻度失稳状态。在 111~120 d 内,池容产甲烷率下降至 $0.02 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$,系统产气受到了严重抑制,系统进入重度失稳状态。发酵至 121 d 时,产气停止,此时系统处于极度失稳状态。由此可知,甲烷池容产气率的变化规律是从轻微下降到急剧下降的过程,尤其在较短时间内急剧下降,有滞后性,不适宜单独作为失稳预警指标。在运行负荷为 $0.5 \sim 1.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 期间内, CH_4/CO_2 比值基本保持在 1.23 以上,此时发酵体系以产 CH_4 为主,水解酸化菌与产甲烷菌间的串联代谢关系比较稳定,发酵能正常进行。在发

酵进行到 $1.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时(第 63 d), CH_4/CO_2 降低至 1.23 以下,但随着试验继续进行,至 83 d 比值恢复至 1.23 以上。当有机负荷率增大至 $2.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时,发酵进行至 100 d 时, CH_4/CO_2 比值再次降低至 1.23 以下,直到 121 d 比值降低为 0。以 CH_4/CO_2 指标为例,彻底停止产甲烷时间为第 121 d,该指标在此之前的第 100 d 发生最大突变为 1.47 降至 1.23,因此,认为该指标的失稳预警天数为 21 天,失稳预警值为 $\text{CH}_4/\text{CO}_2 < 1.23$ 。

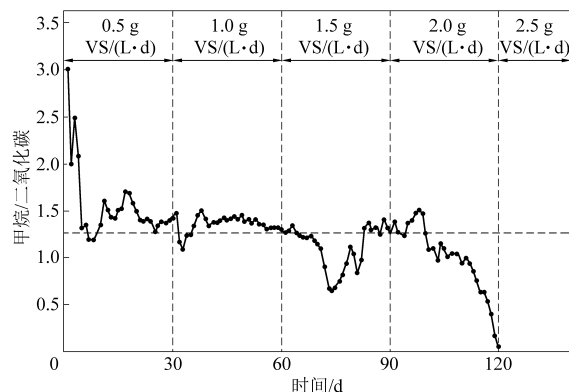
2.2 挥发性脂肪酸的变化规律

试验过程中乙酸、丙酸、丁酸以及戊酸的变化情况详见图 3。

由图 3 可知,随着试验的进行,不同的挥发酸(VFA)呈现出不同的规律性。在有机负荷率为 $0.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 阶段的前 20 d,由于此时处于物料置换接种物的阶段,反应器中各种 VFA 的含量波动较大。20 d 后,原料完全置换,系统处于较稳定的时期,此时各种 VFA 的含量趋于稳定。当有机负荷率增加至 $1.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时,各种 VFA 的含量较低,尤其是正/异丁酸及正/异戊酸含量几乎为 0。这是由于产酸菌与产甲烷菌的代谢过程保持了平衡状态,产生的 VFA 很快被消耗掉,因此在体系中只剩下极少量的 VFA。



(a) 池容产甲烷率随发酵时间的变化



(b) 甲烷/二氧化碳随发酵时间的变化

图 2 池容产甲烷率和甲烷/二氧化碳随发酵时间的变化

Fig.2 Changes of volumetric methane production rate (VMPR) and CH_4/CO_2 with fermentation time

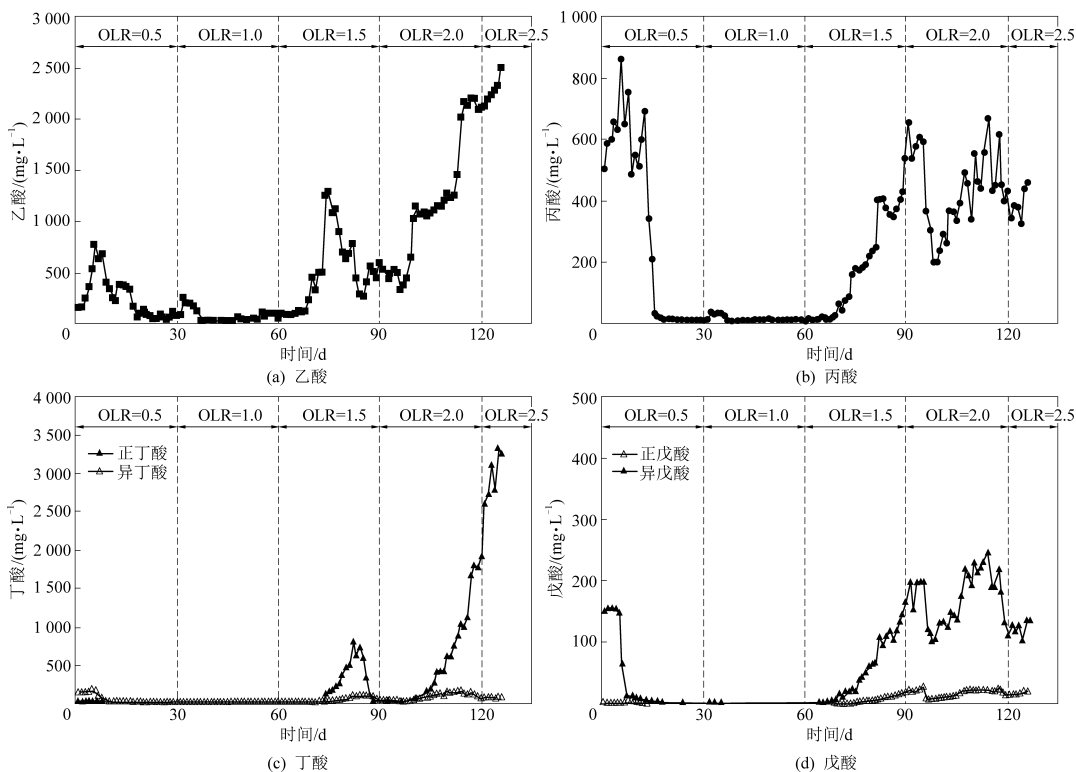


图 3 试验过程中乙酸、丙酸、丁酸以及戊酸的变化情况

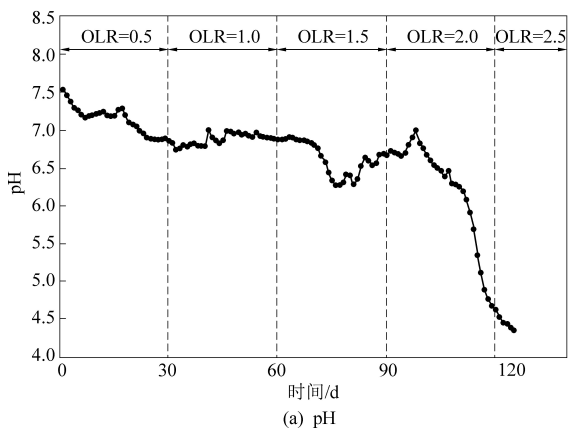
Fig.3 Changes of acetic acid, propionic acid, butyric acid and valeric acid during the test

当有机负荷率增加至 $1.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时 ($72 \sim 75 \text{ d}$), 乙酸的浓度剧烈增加至 $1\,297 \text{ mg}/\text{L}$ 。但在 $75 \sim 85 \text{ d}$, 其浓度开始逐渐下降至 $252 \text{ mg}/\text{L}$ 。丙酸浓度在 $73 \sim 90 \text{ d}$ 期间迅速增加, 从不足 $100 \text{ mg}/\text{L}$ 增加至 $660 \text{ mg}/\text{L}$ 。正丁酸的变化规律与乙酸相似, 均是先增大后减小。在 $73 \sim 82 \text{ d}$ 之间, 其浓度显著增加; 在 $82 \sim 88 \text{ d}$ 之间, 其浓度降低至较低水平; 其浓度在 82 d 达到了峰值 ($790 \text{ mg}/\text{L}$)。异丁酸在 $75 \sim 88 \text{ d}$ 期间, 其浓度从 $40 \text{ mg}/\text{L}$ 增加至 $105 \text{ mg}/\text{L}$ 。正戊酸浓度基本维持在较低水平 ($<30 \text{ mg}/\text{L}$)。在 $76 \sim 90 \text{ d}$ 期间, 异戊酸的浓度持续增加, 从 $40 \text{ mg}/\text{L}$ 增加至 $200 \text{ mg}/\text{L}$ 。

随着有机负荷率的持续增加 ($2.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$), 乙酸及正丁酸浓度分别在 99 d 及 100 d 再次出现剧烈增加, 分别达到 $2\,498 \text{ mg}/\text{L}$ 及 $3\,314 \text{ mg}/\text{L}$, 直至厌氧发酵体系达到极度失稳的状态。丙酸、异丁酸及异戊酸浓度分别在 $99 \sim 114 \text{ d}$ 、 $100 \sim 118 \text{ d}$ 及 $99 \sim 118 \text{ d}$ 之间增加至 $663 \text{ mg}/\text{L}$ 、 $160 \text{ mg}/\text{L}$ 以及 $250 \text{ mg}/\text{L}$ 。其值达到峰值后开始降低, 直到体系极度失稳, 最终浓度分别在 $300 \text{ mg}/\text{L}$ 、 $100 \text{ mg}/\text{L}$ 及 $130 \text{ mg}/\text{L}$ 以下。

2.3 pH、ORP、碱度及氨氮的变化规律

图 4(a) 反映了厌氧发酵体系中 pH 的变化规



律。发酵初期 ($0.5 \sim 1.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$), pH 变化趋势相对较为稳定, 基本维持在 $6.5 \sim 7.5$ 之间, 较适宜产甲烷菌的生长^[11]。随着 OLR 增大至 $1.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$, 在 $74 \sim 83 \text{ d}$ 期间, pH 值低于 6.5 并持续降低, 最低 pH 为 6.28 。在 83 d 后, pH 值出现回升。当有机负荷率增大至 $2.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时, 在 $99 \sim 110 \text{ d}$, pH 略微下降至 6.5 以下; 在 $111 \sim 120 \text{ d}$, pH 开始出现剧烈的下降, 分别于 113 d 、 115 d 及 117 d 下降至 6.0 、 5.5 以及 5.0 以下; 在 121 d ($2.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$) 时, $\text{pH} < 4.5$ 。在厌氧发酵体系中, 当 $\text{pH} < 6.0$ 时氢离子的浓度较高, 不仅对酸化菌产酸过程有一定的影响, 同时也严重抑制了产甲烷菌的代谢活动^[12]。

图 4(b) 反映了发酵体系的氧化还原电位 (ORP) 的变化规律。厌氧消化初期 ($0.5 \sim 1.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$), 系统的 ORP 均保持在 -500 mV 以下。当有机负荷率增加至 $1.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ (发酵至 64 d) 时, ORP 开始大于 -500 mV 。在 $64 \sim 83 \text{ d}$, ORP 出现先增大后减小的趋势; 在 76 d 时, ORP 出现小高峰, 峰值为 -452 mV , 在第 83 d 时, ORP 恢复至 -480 mV 以下。持续增加有机负荷率至 $2.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$, 其 ORP 也持续增加。在 113 d 、 117 d 时, 其 ORP 值分别为 -460 mV 以及 -400 mV 。系统最终停止产气时, 其 $\text{ORP} > -100 \text{ mV}$ 。

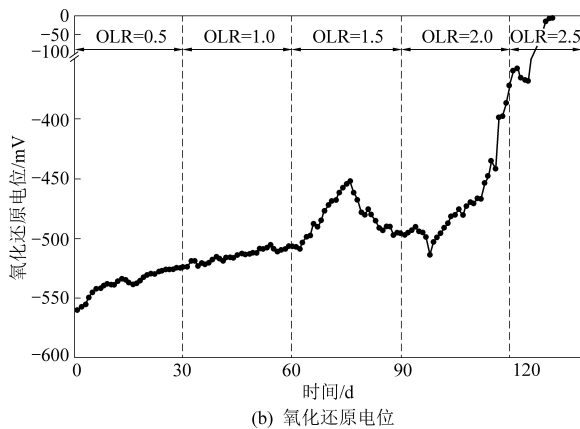


图 4 试验过程中 pH 和氧化还原电位变化

Fig. 4 Changes of the pH and oxidation reduction potential during the test

图 5 反映了高温厌氧发酵体系中碱度与氨氮的变化规律。在厌氧发酵前期 ($0.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$), 总碱度 (TA)、碳酸氢盐碱度 (BA) 及挥发酸碱度 (IA) 大幅度减少, 此阶段由于处于接种物与物料的置换时期, 系统的波动较大。当有机负荷率增加至 $1.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时, 发酵体系处于稳定时期, 此时由于发酵体系中产甲烷菌对 VFA 的及时消耗, 剩下极少量的 VFA。TA、BA 以及 IA 虽然有小幅度的减少, 但基本保持稳定, 分别在 $2\,500 \sim 4\,500$

mg/L 、 $2\,500 \sim 4\,500 \text{ mg}/\text{L}$ 及 $480 \sim 680 \text{ mg}/\text{L}$ 范围内波动。继续提高有机负荷率至 $1.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$, 当发酵至 73 d 时, 碱度出现较大幅度的波动, $\text{TA} < 2\,000 \text{ mg}/\text{L}$ 、 $\text{BA} < 1\,500 \text{ mg}/\text{L}$ 、 $\text{IA} > 800 \text{ mg}/\text{L}$ 。BA 以及 IA 在 78 d 达到峰值, 分别为 $663.5 \text{ mg}/\text{L}$ 以及 $1\,099.6 \text{ mg}/\text{L}$ 。在 $98 \sim 114 \text{ d}$ ($2.0 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$) 时, 在 BA 迅速减少的同时 IA 迅速增加。在 114 d , BA 降低为 0 , IA 增加至 $1\,780 \text{ mg}/\text{L}$ 。此时由于系统超负荷运行, 造成 VFA 累积, 大量的 BA

与VFA反应生成IA。在114 d之后,IA持续下降,直至发酵停止产气。如图5所示,在厌氧发酵初期(0.5 g VS/(L·d)),由于蔬菜废弃物本身氨氮含量较低(见表1),加之置换接种物过程中流失大量的氨氮,导致氨氮的含量大幅度的减少。随着有机负荷率的持续增加,氨氮的含量基本保持稳定,均在200~400 mg/L之间小幅度波动。因此,蔬菜废弃物高温厌氧发酵体系中没有出现氨抑制的作用^[13]。

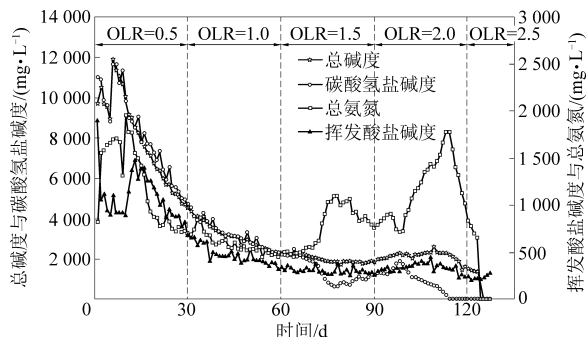


图5 试验过程中碱度和总氨氮的变化规律

Fig.5 Changes of alkalinity and total ammonium nitrogen during the test

2.4 VFA/BA、BA/TA 及 IA/BA 耦合指标的变化规律

VFA/BA、BA/TA 及 IA/BA 耦合指标和甲烷含量随时间的变化情况详见图6。

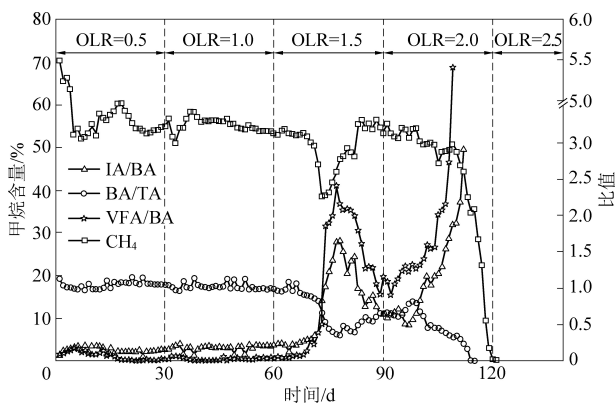


图6 各种耦合指标和甲烷含量随时间的变化情况

Fig.6 Changes of various coupling indexes and methane content with time

由图6可知,发酵体系在发酵前期(0.5~1.0 g/(L·d)),CH₄含量均在50%以上,此时VFA/BA<0.3、BA/TA>0.8、IA/BA<0.4。当有机负荷率增大至1.5 g/(L·d)时,发酵至72 d,此时CH₄含量低于50%,VFA/BA>0.4、BA/TA<0.8、IA/BA>0.4,发酵进行至74~83 d,VFA/BA>1.8、BA/TA<0.5、IA/BA>1.0,此时高温厌氧发酵体系

出现失稳迹象,但83 d后,CH₄重新恢复至50%以上,由公式(1)可知,此时产甲烷菌利用有机酸产甲烷过程中重新生成BA。随着BA的增大,高温厌氧发酵体系的缓冲性能增大,同时IA相应减少。当有机负荷率继续增大至2.0 g/(L·d),发酵进行至105 d时,CH₄含量降低至50%以下,此时VFA/BA>1.8、BA/TA<0.5、IA/BA>1.2,直到高温厌氧发酵体系停止产气。蔬菜废弃物高温厌氧发酵各指标预警天数如表3所示。在本研究中,BA具有最强的失稳预警性能,能提前23 d预警,而对于蔬菜中温厌氧消化系统,BA只能提前13 d预警,预警性能最强的指标为丙酸^[14]。



表3 蔬菜废弃物高温厌氧发酵体系预警指标

Table 3 The early warning indexes of the thermophilic anaerobic fermentation system of vegetable waste

指标	预警天数/d	阈值
CH ₄ /CO ₂	21	<1.23
ORP	8	>-460 mV
pH	8	<6
BA	23	<1 500 mg/L
乙酸	22	突变
正丁酸	21	突变
VFA/BA	16	>1.8
BA/TA	16	<0.5
IA/BA	16	>1.2

3 结 论

针对蔬菜废弃物高温厌氧消化系统,采用连续冲击负荷的方式探究其稳定性能以及失稳预警指标。通过失稳预警指标的构建,为蔬菜废弃物高温厌氧消化系统的稳定高效运行提供了有效的参考指标。

(1) 对于蔬菜废弃物高温厌氧发酵系统,CH₄/CO₂间接地指示厌氧消化系统的稳定性,可以提前预警的天数为21 d,具有最强的失稳预警性,因此可以作为蔬菜废弃物高温厌氧发酵体系的预警指标。

(2) 乙酸、正丁酸浓度分别在22 d、21 d出现突变,因此,也可以较好的指示体系的失稳状况,作为预警指标。

(3) BA具有最强的失稳预警性能,且其耦合指标VFA/BA、BA/TA、IA/BA也可以作为失稳预警指标,当VFA/BA>1.8或BA/TA<0.5或IA/BA

>1.2 时,高温厌氧发酵体系即将失稳。

(4)pH 和 ORP 的监测相对比较容易实现,当 pH<6.0,ORP>-460 mV 时,系统失稳,但预警天数均不足 10 d,具有滞后性,预警性能较差。

参考文献

- [1] 董永亮. 果蔬废弃物两相厌氧消化特征研究 [J]. 能源环境保护, 2011, 25 (4): 19-23.
- [2] 邓舟, 张妍, 张姜. 城市生物质废物厌氧消化处理可行性分析 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (5): 143-146.
- [3] 付尹宣, 桂双林, 廖梦垠, 等. 混合厌氧发酵产沼气研究进展 [J]. 能源研究与管理, 2016 (1): 11-14.
- [4] 王艳飞, 徐锐, 史珊, 等. 蔬菜废弃物厌氧发酵制沼气的工艺条件研究 [J]. 可再生能源, 2019, 37 (8): 1107-1112.
- [5] 付嘉琦, 付尹宣, 晏恒, 等. 秸秆厌氧发酵预处理技术研究进展 [J]. 能源研究与管理, 2018 (4): 21-23+35.
- [6] 李云芳, 袁海荣, WACHEMO A C, 等. 进料配比对牛粪和玉米秸秆半连续厌氧发酵的影响 [J]. 可再生能源, 2020, 38 (1): 13-18.
- [7] 付嘉琦, 林敏, 闫冰, 等. 污泥厌氧发酵外源添加剂研究进展 [J]. 能源研究与管理, 2019 (4): 17-19+25.
- [8] 贾传兴, 彭绪亚, 黄媛媛, 等. 有机垃圾厌氧消化系统失稳预警指标的研究进展 [J]. 中国给水排水, 2011, 24: 30-35.
- [9] POLAG D, MAY T, MULLER L, et al. Online monitoring of stable carbon isotopes of methane in anaerobic digestion as a new tool for early warning of process instability [J]. Bioresource Technology, 2015, 197: 161-170.
- [10] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st Edition) [R]. Washington D. C.: American Public Health Association, 1998.
- [11] MEI Z, LIU X, HUANG X, et al. Anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and chicken manure: Effects of organic loading rate on process stability and performance [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2016, 179 (5): 846-862.
- [12] WARD A J, HOBBS P J, HOLLIMAN P J, et al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources [J]. Bioresource Technology, 2008, 99 (17): 7928-7940.
- [13] POIRIER S, MADIGOU C, BOUCHEZ T, et al. Improving anaerobic digestion with support media: Mitigation of ammonia inhibition and effect on microbial communities [J]. Bioresource Technology, 2017, 235: 229-239.
- [14] 陈琳, 李东, 文昊深, 等. 蔬菜废弃物中温厌氧发酵酸化失稳预警指标筛选 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (1): 225-230.