

接种量对青贮玉米秸秆与牛粪混合消化 产气性能影响

任海伟^{1,3}, 姚兴泉^{1,2}, 李金平^{1,3}, 李志忠², 王宇杰^{1,2}, 王春龙^{1,3}

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 兰州 730050;

3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州 730050)

摘 要:为进一步优化青贮秸秆的厌氧发酵条件,在37℃中温、总固体浓度为10%条件下,研究不同沼液接种量(20%、25%和30%)对青贮玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产沼气性能的影响,详细考察产气特性参数、发酵液中挥发性脂肪酸(VFAs)、化学需氧量(COD)和氨态氮(NH_4^+-N)等含量以及秸秆消化前后的化学组成和结构变化。厌氧消化结果表明,接种量为30%时的产气效果优于其余接种量(20%和25%),该组秸秆的纤维素和半纤维素降解率最高,分别为27.31%和49.77%,但木质素几乎未被分解。扫描电镜(SEM)和X射线衍射(XRD)结构特性表明,消化前后秸秆的木质纤维结构变化明显,纤维素结晶度减小,且接种量为30%时秸秆的木质纤维结构破坏最严重,结晶指数最小,故确定接种量为30%时青贮秸秆产气效果最佳。

关键词:青贮秸秆;牛粪;混合厌氧消化;接种量;化学组分;结构表征

中图分类号:S216.4;TK6 **文献标识码:**A

0 引 言

随着化石能源枯竭、生物能源需求增加以及农业生态环境治理等发展要求,沼气开发因其既能提供清洁能源又能减少农牧废弃物污染而成为生物能源的研究热点。农作物秸秆是大中型沼气工程的重要原料,2015年中国作物秸秆理论资源量为10.4亿t,可收集量约9亿t,其中约1.8亿t可供沼气生产利用,沼气生产潜力约500亿 m^3 。但由于作物秸秆的季节收获特性,亟需采取适宜的跨季节贮存方法才能保障原料可持续供给;以青贮为代表的湿法贮存技术能有效解决秸秆贮存问题,进而保障沼气生产的全年连续运行^[1]。国外学者已从作物收获时间、青贮过程、青贮添加剂、青贮周期、粒径等角度,研究了不同青贮作物的产沼气性能,发现作物青贮后能使沼气产量提高3%~15%^[2~4]。国内学者也从厌氧消化参数、玉米品种和贮存方式等角度研究了全株玉米^[5]、水葫芦和稻秸^[6]及玉米秸秆^[7]等

作物青贮后的产沼气能力,发现全株玉米青贮后的甲烷产量明显高于鲜玉米,青贮玉米秸秆的总产气量和甲烷含量均优于干黄秸秆,水葫芦和稻秸混合青贮可提高甲烷浓度和累计甲烷产率。崔宪等^[8]通过协同添加葡萄糖、乙酸至干黄玉米秸秆进行湿贮存,能使秸秆产气潜力提高8.7%。本课题组也发现青贮有利于提高玉米秸秆的沼气产量和品质^[9]。

然而,由于秸秆青贮后的理化特性发生明显变化,尤其长时间酸性环境和有机酸生成使秸秆进入厌氧发酵的酸化时间延长,直接影响产甲烷菌活性和产气效果。因此,青贮秸秆需与猪粪^[10]、餐厨垃圾^[11]、牛粪^[12]等废弃物进行混合厌氧消化来提高消化系统稳定性和产气效果。另外,厌氧发酵启动时需加入适量的接种物来提供厌氧发酵所需的微生物菌群,接种物与底物之间的比例对厌氧发酵能否稳定运行及产气特性至关重要。随着接种比例的升高,代谢产物由 H_2 向 CH_4 逐渐过渡,反应器运行

收稿日期:2016-03-16

基金项目:国家自然科学基金(51666010);中国博士后科学基金面上项目(2018M631217);甘肃省自然科学基金(1606RJZA206;17JR5RA117)

通信作者:李金平(1977—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事先进可再生能源系统方面的研究。lijinping77@163.com

的稳定性得以提升,但会导致反应器处理能力下降。针对不同的消化反应体系,筛选适宜的接种比例很有必要。为进一步明确青贮玉米秸秆(maize straw silages, MSS)的厌氧消化参数,本文在前期研究基础上,从产气特性、发酵液参数、秸秆化学组分和结构特性等角度,综合考察不同接种量对青贮玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产气潜力的影响,从而筛选适宜的接种量,以期青贮秸秆沼汽化工程设计提供理论基础和技术依据。

1 实 验

1.1 试验材料

鲜玉米秸秆取自甘肃省陇西县,玉米全株摘取玉米穗后获得鲜秸秆,切断至 1~2 cm 后立即进行实验室常规青贮,青贮周期为 240 d。鲜牛粪,取自兰州市七里河区农户。沼液取自兰州西固花庄奶牛场沼汽工程,取回后加入新鲜牛粪(质量比 1:10)密封常温驯化 15 d 制得接种物。厌氧消化原料的特性参数如表 1 所示。

表 1 厌氧消化原料的特性参数			
Table 1 Characteristic parameters of anaerobic digestion feedstock			
原料	总固体 (TS)/%	挥发性固体 (VS)/%	碳氮比 C/N
青贮秸秆	19.82±0.01	14.88±0.00	32±0.05
牛粪	20.06±0.02	17.99±0.01	24±0.03
沼液接种物	2.09±0.00	1.07±0.00	—

1.2 仪器与设备

TDL-5-A 离心机(上海安亭科学仪器厂);HH-8 数显恒温水浴锅(国华电器有限公司);GZX-9240MBE 数显鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司);UV-9200 紫外可见分光光度计(北京瑞利分析仪器公司);GC9790II 气相色谱仪(浙江福立分析仪器有限公司);Biogascheck 沼汽分析仪(英国 Geotech 公司);JSM5600LV 扫描电镜(日本 JEOL 公司);D/MAX-2004 粉末 X 射线衍射仪(日本理学公司)。

1.3 厌氧消化试验设计

本研究采用 1.5 L 发酵瓶进行批式厌氧消化,

总填料质量为 1000 g。牛粪和 MSS 的混合 TS(即总固形物)质量比为 7:3^[9],二者具体加入量如表 2 所示,进料后补水至 1000 g。发酵体系的总固体浓度(total solid, TS)为 10%,初始 pH 值为 7.5。设置接种物添加量为 20%(I 组)、25%(II 组)和 30%(III 组)3 个梯度,3 个处理组的 C/N 值均为 26.38。对照组只加牛粪和接种物。每个处理组做 3 个重复,37 ℃中温发酵。反应瓶每天摇振 3 次,消化过程直至无气体产出为止。采用 2 L 铝箔集气袋收集气体,体积测定采用排水法。每天测量发酵液 pH 值、气体成分和产气量,并间隔 4 d 取样测定化学需氧量(chemicals oxygen demand, COD)、挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)和氨态氮(ammonia nitrogen, NH₄⁺-N)等参数。发酵结束时,分离青贮秸秆发酵残渣,105 ℃烘干恒重后用于化学组分和结构分析。

表 2 厌氧消化原料的添加方案			
Table 2 Addition program of anaerobic digestion feedstocks			
组别	青贮秸秆/g	牛粪/g	接种物/g
I 组	146.89	342.70	200.00
II 组	146.09	340.83	250.00
III 组	145.29	338.95	300.00

1.4 分析方法

中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)测定采用范式分析法。纤维素(cellulose, CL)质量分数为 ADF 和 ADL 之差。半纤维素(hemicellulose, HC)质量分数为 NDF 和 ADF 之差。挥发性固体(volatile solids, VS)和 TS 测定采用烘干法,其中 TS 为 105 ℃烘烤 24 h, VS 为 550 ℃灼烧 4 h。沼汽成分用 Biogas check 沼汽分析仪测定。pH 值用奥利龙 PHS3C 型便携式 pH 计测定;VFAs 测定用分光光度法;COD 测定用重铬酸钾法;NH₄⁺-N 测定用苯酚次氯酸钠比色法;结构特性分析采用扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)和 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)。

1.5 统计方法

试验数据用 SPSS 软件处理,置信水平为 95%时, $P < 0.05$,说明数据在统计学上存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 接种量对发酵液特征参数的影响

2.1.1 发酵液 pH 值

如图 1 所示,整个发酵周期内 3 个处理组的 pH 值均在 6.5~7.5 内波动,总体呈“下降—平稳—上升—下降—平稳—上升”的趋势。发酵初始阶段(0~5 d),3 个处理组的 pH 值均有所下降,这是由于发酵初期酸化水解生成的有机物被产乙酸菌利用的速率大于乙酸被产甲烷菌利用的速率,导致有机酸累积所致。而且,接种量越高,pH 值的降幅越大,这是因为高接种量意味着体系中发酵性细菌、产氢产乙酸菌和同型产乙酸菌含量越高,使底物有机质酸化启动较快。之后 pH 值稳定一段时间又逐渐升高(10~20 d),且Ⅲ组升高最快,此时产甲烷菌逐渐趋于活跃,不断代谢利用有机酸等中间产物生成以甲烷为主成分的沼气。发酵中期(20~45 d)为产沼气主要阶段,此时发酵体系中的挥发酸和弱碱性物质($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等)处于动态平衡,使 pH 值稳定在 6.8~7.0 内,同时水解酸化反应和产甲烷反应也达到适度平衡,有利于稳定产气^[13]。另外,底物混合料本身的碱度对 VFAs 积累也有一定的缓冲能力。发酵后期(45~62 d)消化液 pH 值又逐渐升高,这可能是因为反应后期原料中易消化组分被逐渐分解消耗,水解酸化进程放缓,而产甲烷菌的繁殖和活性仍较强,不断消耗有机酸,使 pH 值升高。

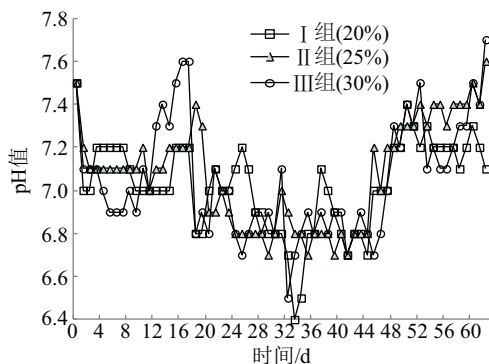


图1 混合厌氧消化过程中pH值的变化

Fig. 1 Changes of pH value during anaerobic co-digestion

2.1.2 发酵液挥发性脂肪酸(VFAs)质量浓度

VFAs 是微生物代谢过程的重要中间产物。高浓度 VFAs 会抑制厌氧微生物活性,使 pH 值降低,

进而影响沼气产量甚至导致消化反应失败。如图 2 所示,VFAs 浓度总体呈“上升—下降—平稳”的变化趋势。发酵初期,接种物本身含有丰富的营养物质,为产酸菌群提供了生长繁殖的机会,发酵底物被快速酸化水解,生成甲酸和乙酸等小分子有机物,使产氢产酸菌的生长繁殖速度加快,VFAs 浓度不断增大并达到最高值^[14]。到发酵中期,产氢产乙酸菌和产甲烷菌菌群发挥优势,将小分子有机物转化为甲烷和 CO_2 ,VFAs 浓度持续下降。发酵 30 d 后,产酸与产甲烷生化反应趋于平衡,VFAs 浓度稳定在较低水平,约 10 g/L。从图 2 还可看出,接种物比例较高时,VFAs 浓度相对较低,这主要与菌群种类、数量及其将 VFAs 转变为甲烷的能力有关。接种量比例越高,产甲烷菌群越丰富,代谢利用 VFAs 产甲烷的速率较快,因此Ⅲ组的 VFAs 浓度始终低于Ⅱ组和Ⅰ组。

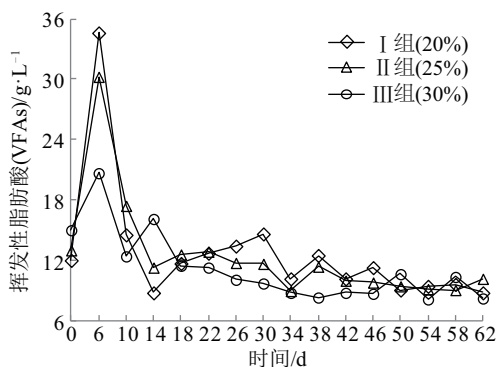


图2 混合厌氧消化过程中总VFAs的变化

Fig. 2 Changes of total volatile fat acids (VFAs) during anaerobic co-digestion

2.1.3 发酵液 COD 质量浓度

由图 3 可知,整个发酵过程中,3 个处理组的 COD 浓度呈先上升后下降的趋势。一方面,发酵液中 COD 浓度的高低与水溶性有机质的产生与消耗的平衡密切相关。在水解产酸阶段,水溶性有机质的产生速率大于其消耗速率,COD 浓度上升;当水解产酸阶段转为产甲烷阶段时,水溶性有机质的产生速率小于其消耗速率,COD 浓度随之下降。另一方面,较高的接种量意味着厌氧发酵微生物菌群数量相对充足,可有效降低消化底物的 COD 浓度,故发酵后期Ⅲ组中 COD 浓度始终低于Ⅰ组和Ⅱ组。

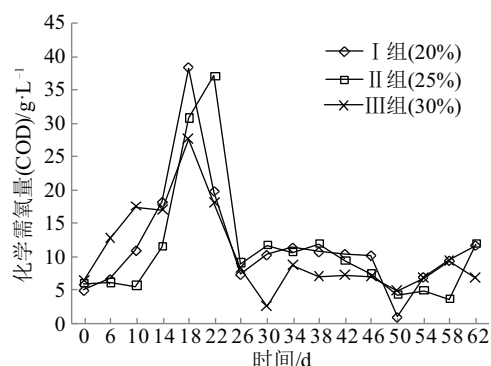


图3 混合厌氧消化过程中化学需氧量(COD)的变化

Fig. 3 Changes of chemicals oxygen demand(COD) during anaerobic co-digestion

2.1.4 发酵液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度

消化液中的氨氮一般以离子氨 (NH_4^+) 和游离氨 (NH_3) 这 2 种形式存在, 二者对厌氧消化反应都有抑制作用, 其抑制效果与 pH 值高低密切相关。如图 4 所示, 3 个处理组中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均呈波动上升趋势, 说明整个发酵过程中的含氮有机物降解生成 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的速率较快, 并形成一定积累效应, 但都未超出氨氮抑制的临界浓度范围 (1500~3000 mg/L), 可见消化过程中的厌氧微生物菌群能协同发展, 使代谢活性得到充分发挥。另一方面, 较高的接种比例有利于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的快速生成, 这可能是由于接种物和消化底物中内源性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的释放以及较快的消化反应速率所致, 所以 III 组中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度略高于其他 2 组。

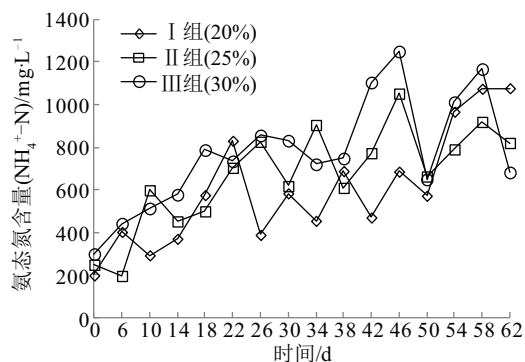
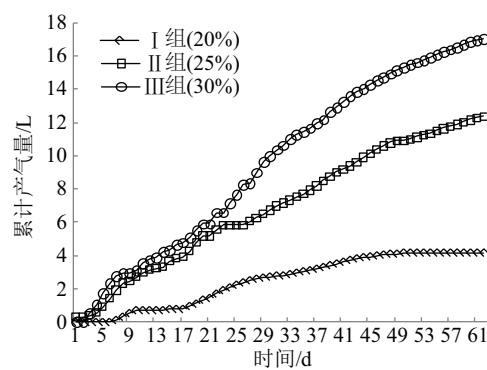
图4 混合厌氧消化过程中氨态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的变化

Fig. 4 Changes of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ during anaerobic co-digestion

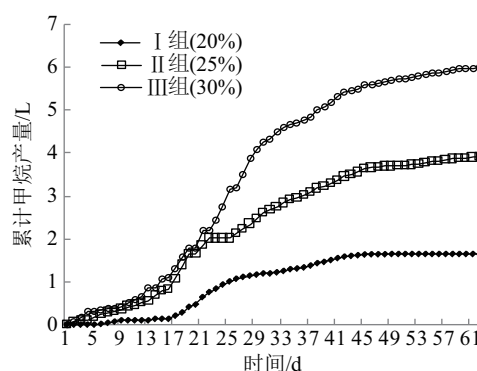
2.2 接种量对消化产气特性的影响

由图 5 可知, I 组、II 组和 III 组这 3 个处理组

发酵结束时的累积产气量分别为 4135、12362、17039 mL, 累积产甲烷量为 1632、3906 和 5989 mL, III 组产气量分别是 I 组的 4.12 倍和 II 组的 1.38 倍, 产甲烷量分别是 I 组的 3.67 倍和 II 组的 1.53 倍, 说明接种量高的试验组产气效果较好。这是因为同等消化体系中的接种量越高, 厌氧发酵微生物菌群数量越多, 与底物有机质的接触机率越大, 有利于促进发酵底物的降解转化, 也有利于产甲烷菌活性的提高, 从而提高了沼气产量和甲烷产量。



a. 累计产气量



b. 累计甲烷产量

图5 厌氧消化过程中的累计产气量和
累计甲烷产量的变化

Fig. 5 Accumulated biogas production and accumulated methane production during anaerobic co-digestion

另外, 随着接种比例的增加, 表 3 中各产气指标参数均有不同程度的升高, 其中 III 组的产气效果最佳, 但该处理组的产气量仍低于文献报道的玉米、刺棘藜和高粱与牛粪混合消化的产气量^[15], 这可能是由于青贮原料组分、青贮周期以及发酵条件等因素不同所致。

表3 不同接种量时混合厌氧消化的产气特性比较
Table 3 Comparison of biogas-producing characteristics in different inoculum contents

分组	I 组(20%)	II 组(25%)	III 组(30%)
日均产气量/mL	66.69 ^a	199.38 ^b	274.82 ^c
TS产气率/ mL·(g TS) ⁻¹	40.20 ^a	120.79 ^b	167.33 ^c
VS产气率/ mL·(g TS) ⁻¹	51.97 ^a	155.17 ^b	213.55 ^c
TS产甲烷率/ mL·(g TS) ⁻¹	15.87 ^a	38.17 ^b	58.82 ^c
VS产甲烷率/ mL·(g TS) ⁻¹	20.51 ^a	49.03 ^b	75.06 ^c

注:同行不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 秸秆发酵前后的木质纤维素组分含量比较

由图6可知,与原料青贮玉米秸秆相比,发酵结束时3个处理组中的秸秆纤维素质量分数分别下降了20.65%(I组)、21.64%(II组)和27.31%(III组),半纤维含量分别下降了31.46%(I组)、39.72%(II组)和49.77%(III组),这2种纤维组分在发酵过程中被厌氧微生物有效分解,尤其半纤维素的降解利用率相对较高,进一步印证了半纤维素更易于被厌氧微生物菌群消化降解的观点。另一方面,木质素很难被厌氧微生物分解利用,与原料相比,I组和II组分别升高了8.51%和7.78%,III组略降了4.41%,3个处理组变化均不显著。

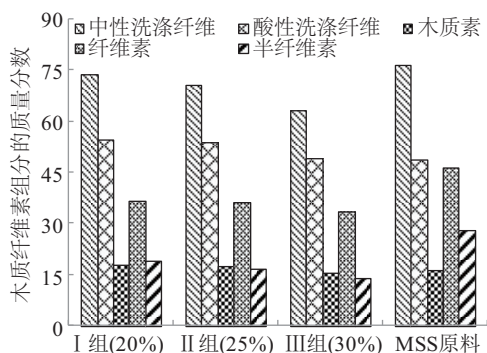


图6 厌氧消化前后的木质纤维素组分比较

Fig. 6 Comparison of lignocellulose contents of MSS before and after anaerobic co-digestion

2.4 秸秆厌氧消化前后的结构特性比较

2.4.1 扫描电镜(SEM)分析

如图7所示,青贮过程能促使玉米秸秆中原先致密的木质纤维混凝土网络结构发生一定破坏,产生裂缝,孔隙率增加,有的部位甚至呈碎片化^[9]。厌氧发酵后的秸秆残渣外观结构变化明显,纤维细胞充分降解,纤维素和半纤维素降解移位后的残留孔洞清晰可见,其中III组的木质纤维结构分解最为严重,即使难以降解的木质化薄壁组织也被部分溶解。

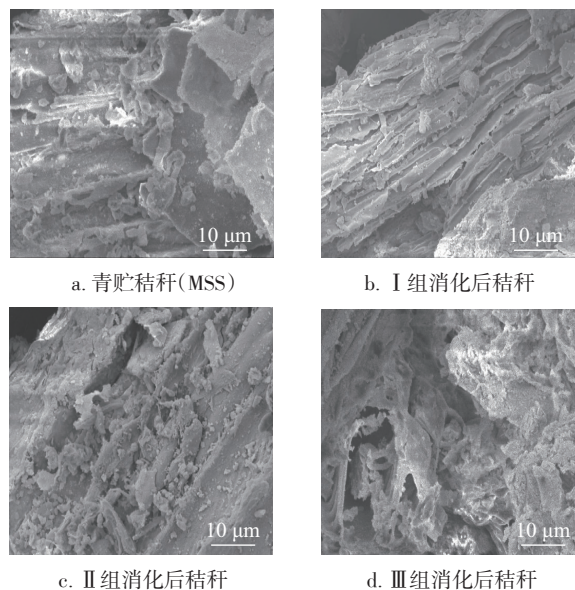


图7 混合厌氧消化前后的MSS扫描电镜对比($\times 2000$)
Fig. 7 Scanning electron microscope (SEM) comparison of maize straw silages (MSS) before and after anaerobic co-digestion ($\times 2000$)

2.4.2 X射线衍射(XRD)分析

天然纤维素由规则紧密的结晶区和无序的无定形区组成,故秸秆中的纤维素呈半结晶状态。如图8所示,青贮秸秆厌氧发酵前后的晶型结构相似,在 $2\theta = 22^\circ$ 附近存在002晶面的极大衍射峰,同时秸秆消化残渣的衍射峰强度增强,峰形变得尖锐,说明纤维素结晶度有所提高。另一方面,相对结晶度指数(CrI)能反应纤维素结晶区所占比例的高低,计算可知原料青贮秸秆CrI为0.43,消化后3个处理组CrI均有不同程度减小,其中III组CrI最小为0.34,II组和I组分别为0.38、0.40。结合图6中纤维素质量分数的下降,推测厌氧消化过程使秸秆纤维素无定形区完全分解,而纤维素结晶区部分也

发生降解,结晶区比例有所下降。

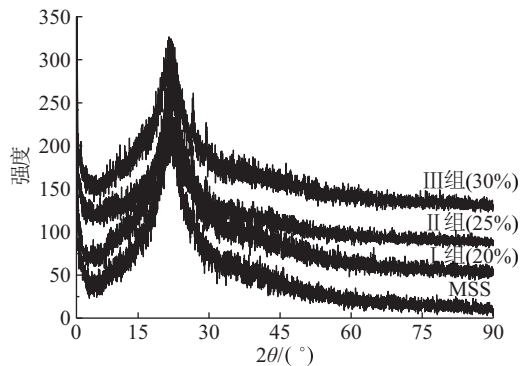


图8 不同接种量MSS消化前后X射线衍射(XRD)对比
Fig. 8 X-ray diffraction comparison of MSS before and after anaerobic digestion in different inoculum contents

3 讨论

厌氧消化产沼气过程是复杂的厌氧生化反应,本文从产气性能、发酵液参数、秸秆化学组成与结构特性等方面探讨了接种量对青贮秸秆与牛粪混合消化产气潜力的影响。试验中,3个处理组的 NH_4^+-N 浓度均低于文献报道的抑制浓度(1500~3000 mg/L),而VFAs浓度却远高于抑制浓度阈值(13000 mg/L)。有研究报道,过高的VFAs浓度会产生酸积累“酸中毒”,抑制产甲烷菌活性^[16]。但试验中并未发生“酸中毒”,因为VFAs的毒性取决于pH值,3个处理组的pH值均维持在6.5~7.5之间,符合产甲烷菌最佳活性范围。另外,产甲烷菌群微环境由代谢过程自然建立的缓冲平衡以及VFAs、 NH_4^+-N 、碱度、 CO_2 和 H^+ 之间的平衡等因素共同决定。当总 NH_4^+-N 浓度较大时, NH_4^+-N 对体系pH值变化有缓冲作用,VFAs的积累并不会显著降低pH值。同时,适量 NH_4^+-N 浓度能提高反应体系的碱度,从而提高对VFAs的缓冲能力,避免pH值发生大的波动。本试验中 NH_4^+-N 、VFAs和pH值之间相互作用形成抑制型稳态,发酵过程得以持续^[17-19]。另外,3个处理组C/N比约为26,符合厌氧消化最适C/N比范围20~30。但这种抑制型稳态仍对产气效果造成了消极影响,这也是本研究中产气量低于文献报道的原因之一。

总之,厌氧发酵的产气量和接种物比例有很大关系,厌氧微生物对底物中营养物质的利用程度由微生物菌群数量及其活性共同决定。相同底物条

件下,接种量越大,微生物菌群数量越丰富,越有利于促进底物的降解消化。

4 结论

1)青贮玉米秸秆与牛粪混合消化过程中,添加适量接种物是沼气发酵稳定运行的保证,较多的微生物有利于发酵原料分解,当接种量为30%时二者混合厌氧消化的产气效果最佳。

2)消化过程中,半纤维素的降解率最高,纤维素次之,木质素几乎未发生分解。

3)SEM和XRD结构特性研究表明,消化前后青贮秸秆的微观结构变化明显,消化后秸秆的纤维素结晶度下降。

[参考文献]

- [1] Pakarinen A, Maijala P, Jaakkola S, et al. Evaluation of preservation methods for improving biogas production and enzymatic conversion yields of annual crops [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2011, 4(20): 1—13.
- [2] Herrmann C, Heiermann M, Idler C. Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(8): 5153—5161.
- [3] Herrmann C, Heiermann M, Idler C, et al. Particle size reduction during harvesting of crop feedstock for biogas production I: Effects on ensiling process and methane yields [J]. *Bio Energy Research*, 2012, 5(4): 926—936.
- [4] Bárbara R, Charles J B, Heaven S. Biochemical methane potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Influence of growth stage and storage practice [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(21): 8179—8184.
- [5] Gao Ruifang, Yuan Xufeng, Zhu Wanbin, et al. Methane yield through anaerobic digestion for various maize varieties in China [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118(8): 611—614.
- [6] 夏益华. 预处理对水葫芦和稻秸厌氧消化产沼气性能的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [6] Xia Yihua. Effect of pretreatments of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and rice straw on biogas production via anaerobic digestion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [7] 井良霄. 干青玉米秸秆厌氧发酵特性与优化工艺研究

- [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [7] Jing Liangxiao. Study on anaerobic digestion properties and process technology optimization of corn stalks [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [8] 崔 宪, 郭建斌, 徐 艳, 等. 秸秆湿贮存过程添加剂协同调控对产甲烷潜力的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 302—310.
- [8] Cui Xian, Guo Jianbin, Xu Yan, et al. Effect of wet-storage additives on fermentation performance and biomethane potential of corn stover [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 302—310.
- [9] 任海伟, 姚兴泉, 李金平, 等. 玉米秸秆储存方式对其与牛粪混合厌氧消化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 213—222.
- [9] Ren Haiwei, Yao Xingquan, Li Jinping, et al. Effect of maize straw storage practice on biogas production performance during anaerobic co-digestion with cattle manure [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 213—222.
- [10] Bułkowska K, Białobrzewski I, Klimiuk E, et al. Kinetic parameters of volatile fatty acids uptake in the ADM1 as key factors for modeling co-digestion of silages with pig manure, thin stillage and glycerinephase [J]. Renewable Energy, 2018, 126: 173—176.
- [11] 葛亚娟, 徐 恒, 苑 泉, 等. 餐厨垃圾与青贮秸秆混合半连续厌氧消化[J]. 中国沼气, 2017, 35(2): 56—61.
- [11] Ge Yajuan, Xu Heng, Yuan Quan, et al. Semi-continuous anaerobic co-digestion of food waste and maize straw silage in CSTR system [J]. China Biogas, 2017, 35(2): 56—61.
- [12] Tišma M, Planinić M, Bucić-Kočić A, et al. Corn silage fungal-based solid-state pretreatment for enhanced biogas production in anaerobic co-digestion with cow manure [J]. Bioresource Technology, 2018, 253: 220—226.
- [13] Angelidaki I, Ahring B K. Thermophilic digestion of livestock waste: The effect of ammonia [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1993, 38(4): 560—564.
- [14] 吴晋锴, 孙 辰, 刘荣厚. 霉处理pH值对小麦秸秆沼气发酵产气特性的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(11): 1964—1968.
- [14] Wu Jinkai, Sun Chen, Liu Ronghou. Anaerobic digestion of wheat straw for biogas production [J]. Acta Energetica Solaria Sinica, 2013, 34(11): 1964—1968.
- [15] Kalamaras S D, Kotsopoulos T A. Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in South Europe [J]. Bioresource Technology, 2014, 172(2): 68—75.
- [16] Wang Ming, Sun Xiangli, Li Pengfei, et al. A novel alternate feeding mode for semi-continuous anaerobic co-digestion of food waste with chicken manure [J]. Bioresource Technology, 2014, 164(7): 309—314.
- [17] Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring B K. A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates: Focusing on ammonia inhibition [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1993, 42(2): 159—166.
- [18] 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.
- [18] Wang Quan, Gong Changxiu, Jiang Jianguo, et al. Effect of NaCl content on VFA concentration and composition during anaerobic fermentation of kitchen waste [J]. China Environmental Science, 2014, 34(12): 3127—3132.
- [19] Bułkowski K, Pokój T, Klimiuk E, et al. Optimization of anaerobic digestion of a mixture of *Zea mays* and *Miscanthus sacchariflorus* silages with various pig manure dosages [J]. Bioresource Technology, 2012, 125(12): 208—216.

EFFECT OF INOCULUM CONCENTRATION ON BIOGAS PRODUCTION PERFORMANCE DURING MIXED DIGESTION OF SILAGES CORN STALK AND CATTLE DUNG

Ren Haiwei^{1,3}, Yao Xingquan^{1,2}, Li Jinping^{1,3}, Li Zhizhong², Wang Yujie^{1,2}, Wang Chunlong^{1,3}

(1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to further optimize the anaerobic fermentation conditions of silage stalk, study the effects of different inoculum concentrations (20%, 25% and 30%) on the biogas production performance of mixed anaerobic digestion of silage corn stalk and cattle dung under the condition of medium temperature of 37 °C and total solid concentration of 10%, and examine the gas production parameters, volatile fatty acids (VFAs) in the fermentation broth, chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) content, and chemical composition and structural changes before and after stalk digestion. The results of anaerobic digestion show that the biogas production performance with the inoculum concentrations of 30% is better than other groups (20%, 25%), the cellulose and hemicellulose degradation rates of this group are the highest, 27.31% and 49.77%, respectively, but the lignin is almost not decomposed. The structural performance results of scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) indicate that the lignocellulosic matrix changes before and after co-digestion of stalk is significant, and the cellulose crystallinity reduces, the lignocellulosic structure damage of stalk is the most serious when the inoculation amount is 30%, and the crystallinity index is the smallest. Therefore 30% inoculum concentration is recommended.

Keywords: silage stalk; cattle dung; anaerobic co-digestion; inoculum concentration; chemical composition; structural characterization