

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.038

不同压缩比和青贮时间下玉米秸秆厌氧发酵性能研究

盛凯^{1,2} 冉毅^{3,4} 艾平^{1,5} 张秀之¹ 孟亮¹ 张衍林¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 湖北工业大学机械工程学院, 武汉 430068;

3. 农业农村部农村可再生能源开发利用重点实验室, 成都 610041;

4. 农业农村部生物质发酵产品质量安全风险评估实验室, 成都 610041;

5. 生猪健康养殖协同创新中心, 武汉 430070)

摘要: 青贮是保障秸秆长期贮存和可持续供应的重要方式, 秸秆压缩后青贮更便于贮存和运输。选用玉米秸秆为原料, 采用不同时间、不同压缩比进行青贮, 分析了相应的玉米秸秆成分变化, 并对压缩青贮后秸秆进行了厌氧发酵产气特性实验。结果表明: 玉米秸秆在长期青贮时, 采取高密度贮存可有效减少干物质损失, 青贮 300 d 时, 未压缩组的总固体(TS)回收率为 26.5%, 1:6 压缩组的 TS 回收率为 51.0%, 较未压缩组提高了 92.5%。延长青贮时间会显著降低玉米秸秆沼气产量, 青贮 40 d 时, 未压缩组的累计产气量为 23.2 mL/g, 而 1:6 压缩组为 282.9 mL/g; 青贮 300 d 时, 未压缩组产气潜力丧失, 1:6 压缩组累计产气量达 200.3 mL/g, 说明采用高压比对保持青贮秸秆的产气性能更为有利。

关键词: 秸秆; 青贮; 秸秆压缩; 厌氧消化; 压缩比例

中图分类号: S216.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)07-0338-08

OSID:



Anaerobic Digestion Performance of Corn Stalk under Different Compression Ratio and Silage Time

SHENG Kai^{1,2} RAN Yi^{3,4} AI Ping^{1,5} ZHANG Xiuzhi¹ MENG Liang¹ ZHANG Yanlin¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. College of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

3. Key Laboratory of Development and Application of Rural Renewable Energy,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China

4. Risk Assessment Laboratory of the Quality Safety of Biomass Fermentation Products,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China

5. The Cooperative Innovation Center for Sustainable Pig Production, Wuhan 430070, China)

Abstract: Silage is an important way to ensure long-term storage and sustainable supply of straw, and more convenient for storage and transportation after compression. However, when silage compressed straw was used for anaerobic digestion to produce biogas, there is a lack of influence on the biogas yield performance of compressed silage parameters. Corn stovers were used as substrate to study the changes of characteristics after different time and different ratios of compressed silage, and the anaerobic digestion biogas yield characteristics were tested. The results showed that with the extension of silage time, the material loss of corn stover was serious, the high-density of corn stover in the long-term silage can effectively reduce the dry matter loss. After 300 d of silage, the cellulose mass fraction of corn stalks was decreased significantly. But after compression, the mass fraction of cellulose and hemicellulose was higher than that of the original straw by 8.5% and 10.6% under the 1:6 compression ratio, respectively. The TS recovery rate of the uncompressed group was 26.5% at 300 d silage, and the TS recovery rate of the 1:6 compression group was 51.0%. It was 92.5% higher than that of the uncompressed group. The prolongation of silage time significantly reduced the biogas potential of corn

收稿日期: 2019-11-18 修回日期: 2019-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972611)、湖北省自然科学基金项目(2018CFB512)和中国农业科学院科技创新工程项目

作者简介: 盛凯(1977—), 女, 博士生, 湖北工业大学讲师, 主要从事农业生物环境与能源研究, E-mail: zphhn100@126.com

通信作者: 艾平(1976—), 女, 教授, 主要从事厌氧发酵技术研究, E-mail: aiping@mail.hzau.edu.cn

stover. At 40 d of silage, the cumulative biogas yield of the uncompressed group was 23.2 mL/g, the 1:6 compression group was 282.9 mL/g. At 300 d of silage, the biogas yield potential of the uncompressed group was lost (2.3 mL/g), and the cumulative biogas yield of the 1:6 compression group was 200.3 mL/g, indicating that high compression ratio was more beneficial to maintain the biogas performance of silage straw.

Key words: stover; silage; stover compression; anaerobic digestion; compression ratio

0 引言

近年来,我国政府不断加大秸秆综合利用的推进力度^[1]。发展秸秆产沼气是实现秸秆规模化能源利用的有效消纳途径^[2],能将秸秆资源多层次转化为高效生物能源和优质有机肥^[3]。玉米作为我国第一大农业作物,每年有大规模玉米秸秆需要进行资源化利用,但作物秸秆收获的季节性与沼气工程周年运行性存在一定矛盾,因此需要对收获秸秆进行贮存。秸秆贮存时,随着贮存时间的延长其水分和糖分会大量流失,引发营养物质损耗和腐败变质^[4]。因此实现秸秆保质贮存并有效利用是秸秆沼气工程所需要解决的问题。

秸秆原料的贮存方式可以分为干式和湿式两种。秸秆干式储存成本低,但干物质损失高达60%,且受收获期间降雨的限制^[5];青贮是一种湿式贮存方式,贮存过程中干物质损失较小,同时也能提高纤维素可转化性,可作为一种生物预处理方法^[6]。青贮可以解决作物秸秆收获的季节性与沼气工程周年运行性的矛盾,目前关于秸秆青贮对厌氧产气性能的影响尚无统一认识。有研究认为,秸秆青贮后水解酸化速率增强,青贮对纤维素降解有积极作用^[7],可促进甲烷产量提高^[8-9];禾本科杂草青贮后产甲烷实验研究表明,青贮对甲烷产率影响不大^[10];另有研究者发现,大麻纤维和饲用玉米秸秆青贮后的甲烷产量明显提高,但蚕豆秸秆青贮后的甲烷产量却有所下降^[11]。这说明秸秆种类和青贮条件会影响产甲烷特性。

秸秆在青贮前常进行粉碎并压块,以便贮存和运输。秸秆压缩青贮是一种简单、直接的贮存方式,只需机械挤压而非复杂的热化学或生化处理。压块可以使秸秆紧实,在不破坏物料物理特性的情况下,排除物料间残留空气,使压缩捆内形成密闭环境,腐败菌活动得到抑制,从而减缓了秸秆在青贮期被微生物分解^[12],并可防止厌氧过程中悬浮层的形成,有提高沼气产量的潜力^[13]。但目前对于秸秆压缩后的青贮参数对秸秆品质和厌氧产气性能的研究较为缺乏。

本文以收获后的玉米秸秆为原料,粉碎压缩青贮后进行厌氧发酵实验,探讨压缩比例及青贮时间

等参数对秸秆特性及厌氧发酵产气特性的影响,以期获得较优的秸秆压缩青贮参数,为大型秸秆沼气工程的秸秆贮存系统提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 秸秆压缩青贮实验

本研究的新鲜玉米秸秆选自华中农业大学试验田的春播玉米,7月中旬果穗刚成熟时收获果实,果实收获后的玉米秸秆用29FQ-400型秸秆粉碎机(河南荥阳市星雨机械厂)粉碎至2~3 cm粒径长度,不添加任何添加剂,用YAW-300C型压力机(上海和晟仪器科技有限公司)将同质量的秸秆分别进行压缩比(压缩后与压缩前体积比)为1:1、1:3、1:4、1:5、1:6的压缩,其中1:1为未压缩的原秸秆(对照组C)。5种压缩比的秸秆分别经过7、40、300 d共3个不同时间的贮存。秸秆贮存期满后取出分析其理化特性,并用密封袋保存,以作为后续厌氧发酵实验的原料。新鲜秸秆的成分特性为总干物质(Total solid, TS)质量分数49.7%、挥发分(Volatile solid, VS)质量分数39.3%、碳氮比为73.4,纤维素、半纤维素和木质素质量分数分别为29.3%、26.8%和12.2%。

1.2 青贮后玉米秸秆厌氧发酵实验

厌氧发酵装置为RTK-BMP型全自动甲烷潜力测试系统(湖北洛克泰克仪器股份有限公司),发酵瓶容积500 mL,有效发酵体积400 mL,沼气产量通过排水法收集。取不同压缩比例和青贮时间处理后的玉米秸秆,加入120 mL接种污泥后用蒸馏水定容至400 mL,总的厌氧发酵TS质量分数为(8±0.2)%,厌氧发酵温度(35±2)℃。接种污泥取自华中农业大学工程训练基地稳定运行的20 m³厌氧发酵池,厌氧污泥TS质量分数为(3.3±1)%。厌氧发酵实验一共有5个压缩比和3个青贮时间的15组玉米秸秆实验组,每个处理设置3个重复。

1.3 分析方法

TS含量采用105℃干燥24 h,差重法测定;VS含量采用550℃灰化4 h,差重法测定;木质纤维素成分含量采用ANKOM A2000i型全自动纤维分析仪(美国)测定,范式法分析;总碳(Total carbon, TC)含量采用Multi N/C 2100型总有机碳/总氮分

析仪、高温催化氧化燃烧法测定;总氮(Total nitrogen, TN)含量用 FIAstar5000 型间断流动注射仪(丹麦 FUSS)采用消解比色法测定;秸秆的红外光谱(FTIR)测定利用 Thermo iS50 型傅里叶红外光谱仪(上海斯迈欧分析仪器有限公司)测定;挥发性脂肪酸(Volatile fatty acids, VFAs)含量采用 GC9790II 型气相色谱仪检测, FID 检测器, KB-WAX 型毛细管柱(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm), 载气为氩气和氢气, 进样口温度 250℃, 柱箱温度 80℃, 程序升温, 检测器温度 250℃, 利用 SPSS 软件进行数据处理以及主成分分析(Principal component analysis, PCA)。

TS、VS 回收率的计算式为

$$R = M_1 / M_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中 R ——回收率, %

M_1 ——青贮后样品中 TS(或 VS)质量, g

M_2 ——原秸秆中 TS(或 VS)质量, g

2 实验与分析

2.1 青贮条件对玉米秸秆成分的影响

2.1.1 玉米秸秆 TS、VS

秸秆沼气工程根据生产需求使用原料, 因此压缩秸秆的青贮时间会有较大区别, 因此本实验中设定了 7、40、300 d 共 3 个短期、中期和长期的青贮时间水平。

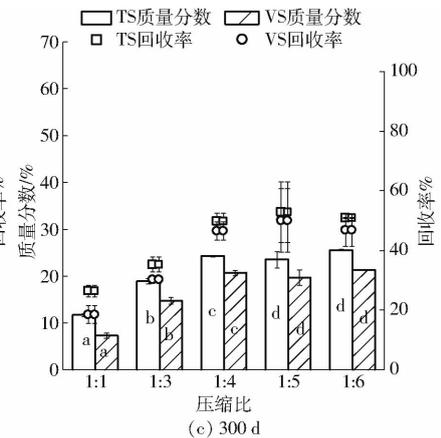
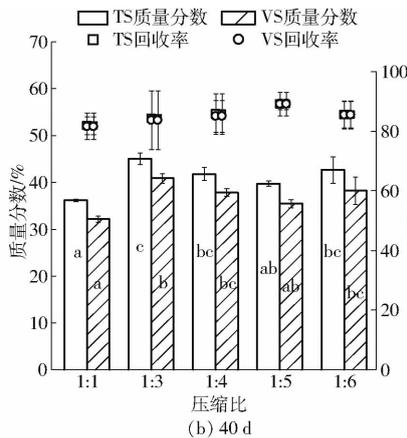
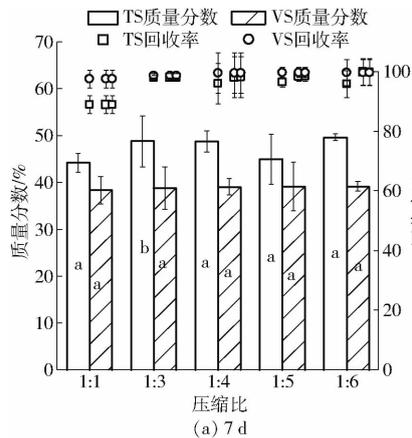


图1 玉米秸秆压缩青贮后 TS、VS 质量分数和回收率变化

Fig.1 Changes of TS and VS with compression ratio after silage compression

2.1.2 玉米秸秆木质纤维素

同一青贮时间经压缩后的玉米秸秆纤维素、半纤维素质量分数均高于对照, 如图 2 所示。玉米秸秆青贮 7 d 时, 未压缩组的秸秆纤维素、半纤维素、木质素质量分数分别为 28.9%、26.7%、12.2%, 压缩对秸秆的纤维素质量分数无显著影响 ($P \geq 0.05$)。青贮 40 d 后, 未压缩秸秆纤维素、半纤维素质量分数降低至 28.6%、22.5%, 而压缩组的纤维

素、半纤维素损失低于未压缩组, 此时压缩对半纤维素质量分数影响显著 ($P \leq 0.05$)。因为在青贮厌氧条件下存在有机物的生物降解^[17], 所以青贮 300 d 时玉米秸秆三组分质量分数有大幅度下降, 这与 TS、VS 所呈现出的趋势相同。300 d 时 1:4、1:5、1:6 压缩比的纤维素、半纤维素质量分数均显著高于对照 ($P \leq 0.05$), 但 1:4、1:5、1:6 组间无显著性差异 ($P \geq 0.05$), 纤维素、半纤维素质量分数在 1:6 压缩

随青贮时间的延长, 玉米秸秆 TS、VS 质量分数总体呈下降趋势(图 1, 图中不同字母表示相同青贮时间不同压缩比实验组间差异显著, 下同), 文献[14]利用玉米进行 49 d 青贮后干物质含量损失高达 4.5%, 根据本研究结果, 青贮 7 d 到青贮 300 d 的玉米秸秆 TS 质量损失率从 11.1% 增长至 76.9%。但经过一定体积压缩后青贮, 较未压缩的对照组能更好地降低质量损失, 特别在较长青贮时间时, 秸秆压缩对降低青贮期质量损失作用明显, 原因是青贮期间高密度贮存有助于能量损失最小化^[15]。文献[16]将青贮密度从 160 kg/m³ 提高到 350 kg/m³ 青贮 180 d 后, TS 质量损失率从 20.2% 降低至 10.0%^[16], 与本研究趋势相同。压缩青贮 7 d 和 40 d 的玉米秸秆均在 1:3 的压缩比例下得到了最高的 TS 质量分数(48.8%、45.1%), 对于短期青贮(7 d)的秸秆影响不显著 ($P \geq 0.05$), 对于青贮 40 d 有显著影响 ($P \leq 0.05$), 但各压缩组间无显著性差异 ($P \geq 0.05$)。对于 300 d 实验组, 所有压缩组 TS、VS 质量分数相对于对照均显著增加 ($P \leq 0.05$), 分别为对照组的 2.2、2.9 倍, 在 1:6 压缩比例时得到了最高 TS 质量分数(25.6%), TS 回收率为 51.0%, 比对照(26.5%)高 92.5%, VS 回收率是对照组(18.6%)的 2.5 倍, 说明秸秆青贮时间较长时则需要进行更高比例的压缩, 以减少物质流失速度。

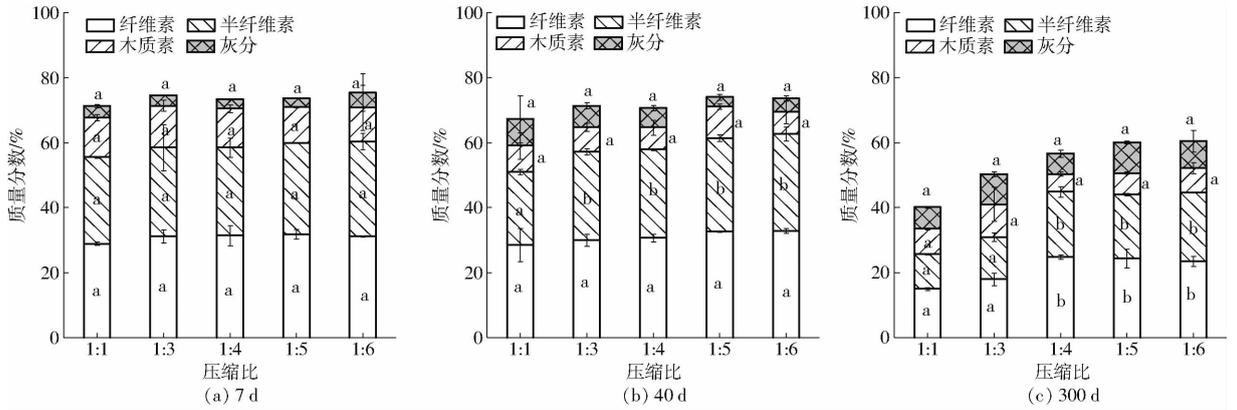


图2 不同压缩比时玉米秸秆青贮后木质纤维素成分

Fig.2 Lignocellulosic composition variations of corn stover with different compression ratios after silage

比条件下质量分数分别高于原秸秆 8.5%、10.6%。木质素对秸秆的厌氧消化有一定阻碍作用^[17],本实验中青贮和压缩均可减少木质素质量分数,但影响并不显著($P \geq 0.05$)。

在青贮时间较短的7、40 d 实验组中,压缩比对三组分的影响较小($P \geq 0.05$)。现实条件下若只需要短时间青贮,则可采用 1:3 较小比例压缩即可,在达到青贮目的的同时可降低能耗,若需要长久时间的青贮,则建议采用 1:4、1:5 等较高压缩比($P \geq 0.05$),综合考虑 1:6 压缩比耗能高且对于干物质的保留效果相对于 1:4、1:5 压缩比并不显著,故不采用($P \leq 0.05$)。

2.1.3 玉米秸秆碳氮比

同一青贮时间,机械压缩后秸秆的总氮质量分数呈减小趋势,但随青贮时间延长,玉米秸秆总氮含量显著增加($P \leq 0.05$),如图 3 所示,这可能与青贮过程中的物质流失有关。氮是植物生长的必要元素,总氮的增加使得厌氧消化后沼渣用于有机肥料时具有更高营养价值^[17]。机械压缩对青贮 40、300 d 玉米秸秆总碳质量比影响显著($P \leq 0.05$),最高分别高于原秸秆 155.9 g/kg (增加 61.6%)、101.5 g/kg (增加 27.8%)。碳氮比随青贮时间延长而减小,在 1:6 压缩比时青贮 7 d 的秸秆碳氮比为 72,厌氧消化最适宜的碳氮比为 25 左右^[18],青贮 40、300 d 时碳

氮比减少为 46.5、41.5,原因是青贮后玉米秸秆总氮含量的增长率高于总碳,有利于后续厌氧消化的进行。

2.2 青贮对玉米秸秆厌氧发酵的影响

2.2.1 玉米秸秆产气量

青贮秸秆用于厌氧发酵的产气结果表明,青贮时间延长会显著降低沼气产量,一定条件下还会失去产气潜力(图 4),这归因于在青贮过程中由于微生物的作用使得纤维素含量减少,或者存在生物物质变质和抑制性产物的情况,长期青贮可能会导致生物物质变质,使得甲烷产量降低 40%^[19]。

未压缩的对照组,青贮 7 d 后的累计产气量为 186.6 mL/g,青贮 40 d 后的累计产气量仅为 23.2 mL/g,300 d 的仅为 2.3 mL/g,说明未压缩秸秆青贮较长时间后使得产气性能完全丧失。但玉米秸秆青贮 300 d 时,若采用压缩贮存方式则依然保留一定产气潜能,300 d 组在 1:6 压缩比时累计产气量最高,为 200.3 mL/g。青贮时间越久,提高压缩比对产气量促进效果越明显,青贮 7 d 时,仅有 1:6 压缩比时累计产气量显著增加($P \leq 0.05$),而其他压缩组产气量增加不明显,这是因为鲜秸秆的纤维结构在高压压缩比时容易受到破坏,使得纤维组更容易转化为碳水化合物,加速了水解和产酸,从而产气量增加^[17]。当青贮 40 d 和 300 d 时,各压缩比的产

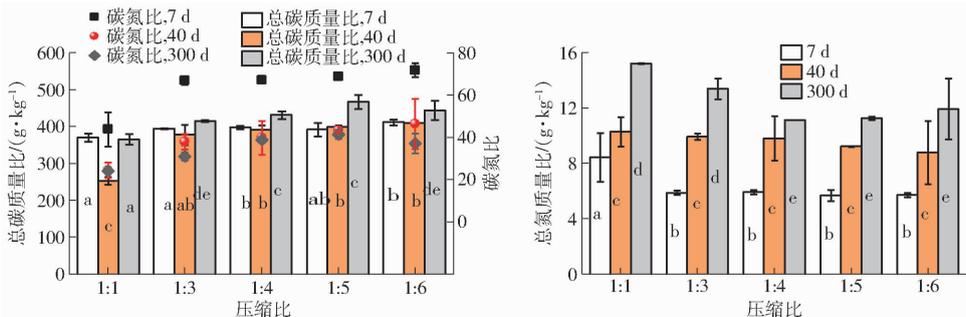


图3 青贮后玉米秸秆碳、氮质量比随压缩比变化

Fig.3 Variations of carbon and nitrogen with different compression ratios of corn stover after silage

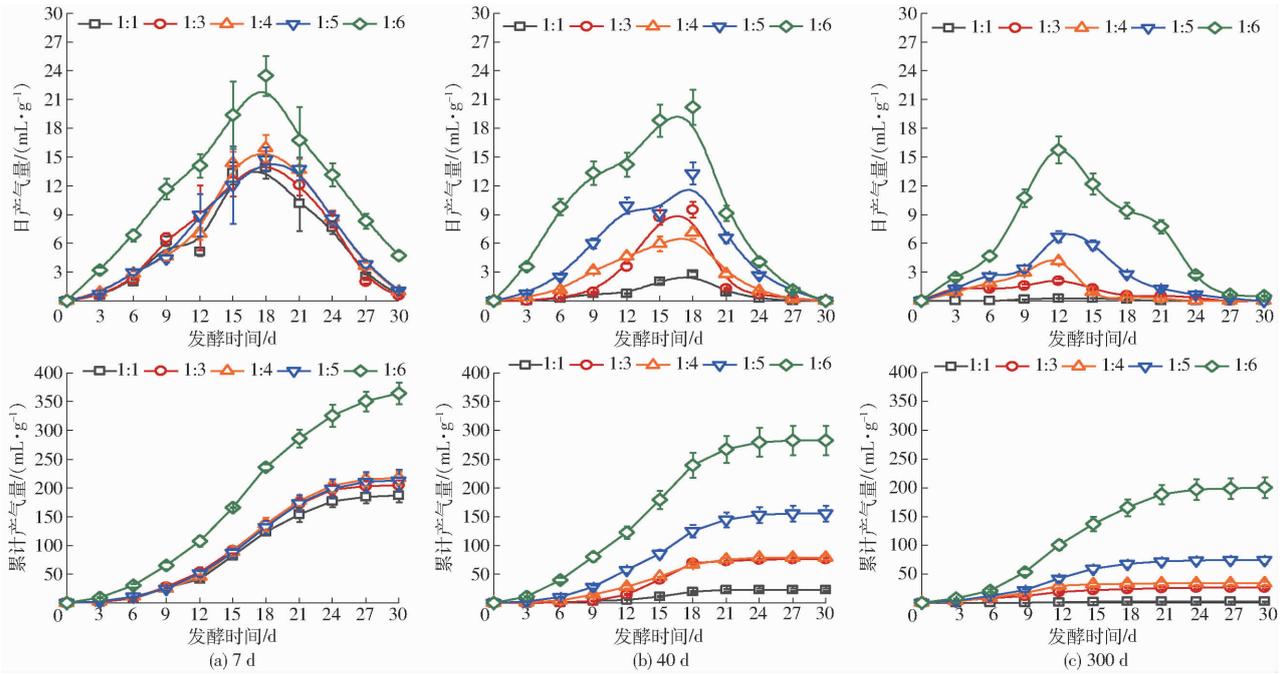


图4 压缩青贮后玉米秸秆产气量

Fig. 4 Biogas yield of compressed silage of corn stover

气量均显著高于对照未压缩组 ($P \leq 0.05$)。相同青贮时间下,增加压缩比可使产气量提高,最大压缩比1:6时在青贮7、40、300 d的累计产气量分别为364.9、282.9、200.3 mL/g,约为对照的1.9、12.2、87.5倍 ($P \leq 0.05$)。

2.2.2 厌氧消化 VFAs 和 pH 值

青贮7 d和40 d的玉米秸秆发酵液初期呈弱酸性,这是由于青贮过程中产生了乳酸和有机酸的影响^[7];青贮300 d的玉米秸秆初期pH值呈弱碱性,青贮300 d的玉米秸秆的VFAs质量浓度远低于其

他2组(图5),且其TS及VS含量较低,说明极有可能在青贮过程中产生了二次发酵导致青贮过程恶化,以及产生了物质流失,这也与产甲烷潜力降低的表现相一致^[20]。

VFAs质量浓度随压缩比提升大体呈增加趋势,但青贮40 d的玉米秸秆在1:4压缩比条件下的VFAs质量浓度最高。整体上VFAs质量浓度表现为中期达到最高值,但在30 d发酵末期均低于800 mg/L,说明厌氧发酵过程完成充分。相应的pH值变化均是先下降再上升,在发酵6~9 d时pH值

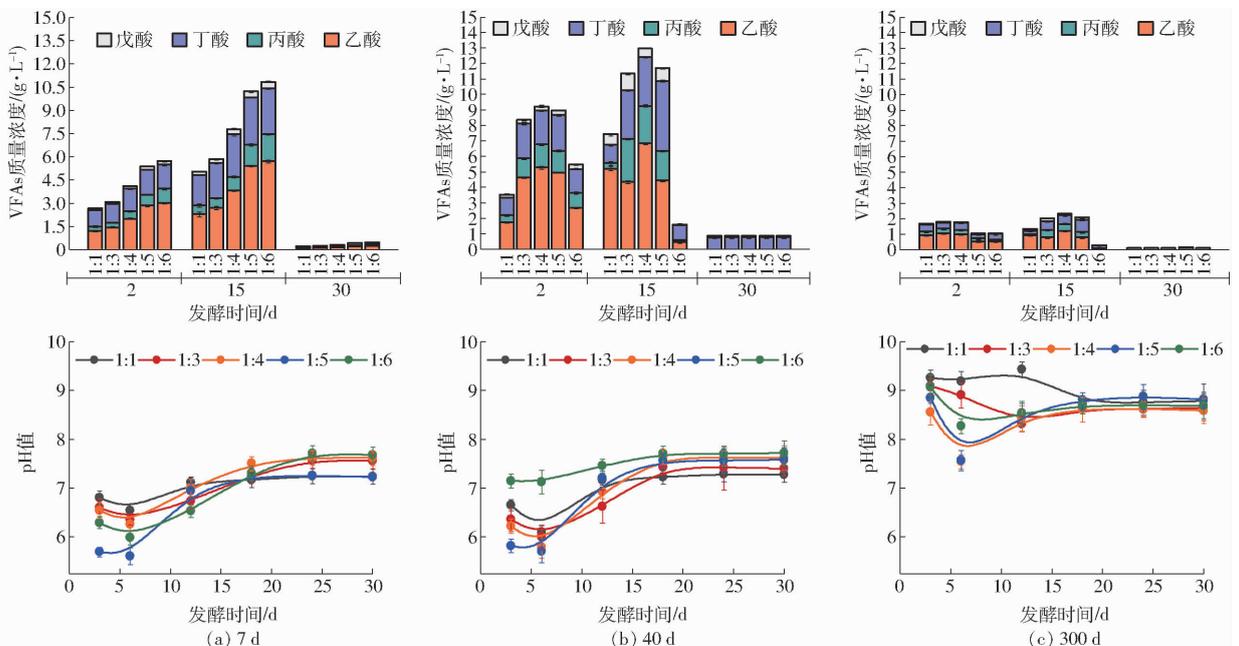


图5 玉米秸秆厌氧发酵中pH值、VFAs质量浓度变化

Fig. 5 Variations of VFAs and pH value in anaerobic digestion of corn stover

达到最低,然后慢慢上升,最终趋于稳定,下降的原因是产酸导致,随着厌氧消化结束,各实验组 pH 值趋于稳定。

2.2.3 玉米秸秆表征基因

利用 FTIR 直观地对木质素结构中的基团和化学键进行表征^[21],青贮 40、300 d 的玉米秸相对于原秸秆在 3 370 cm⁻¹ 波长附近分子内羟基 (O—H) 伸缩振动谱带减弱(图 6),说明青贮过程破坏纤维素分子间的氢键,有利于纤维素的进一步降解,发酵前经 1:6 压缩青贮后在此处的吸收峰增强,说明压缩有利于纤维素在青贮时的保存。1 640 cm⁻¹ 波长附近的峰值为羰基 (C=O) 伸缩振动,与木质素的降

解有关,青贮 7、40、300 d 的玉米秸秆发酵后在此处吸收略微增强,且 1:6 压缩青贮发酵后吸收峰强于对照,说明压缩有利于厌氧过程对木质素的降解,以及过程中有醋酸或醛类物质的生成^[9]。1 250 cm⁻¹ 波长附近吸收峰归属于乙酰酯键,随青贮时间增加此处吸收峰逐渐消失,说明厌氧消化破坏了秸秆内纤维素、半纤维素和木质素之间的部分链接键。1 416 cm⁻¹ 波长附近与木质素的芳香环振动有关^[22],是纤维素结构的特征吸收峰,厌氧发酵前后,此特征吸收峰变化不大,说明虽然厌氧消化对木质纤维素的三组分进行了不同程度的降解,但是对纤维素大分子结构无明显影响。

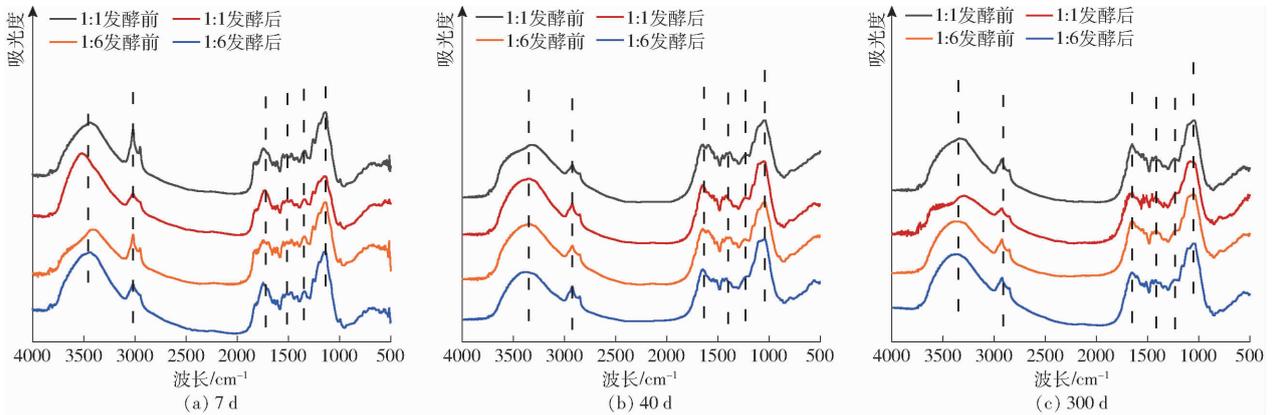


图 6 不同压缩比青贮玉米秸秆发酵前、后红外光谱

Fig. 6 Infrared spectrum before and after fermentation of silage corn stover with different compression ratios

2.2.4 PCA 分析

利用主成分分析法 (PCA) 对实验参数进行描述,并根据所研究的参数对产气过程进行相关性分析,可以更直观分析影响产气量的主要因素。利用 PCA 可以通过获取最小的数据内容来解释实验中影响因子较高的实验参数^[23]。参数选取为:操作参数(青贮时间、压缩比);过程参数(TS 质量分数、VS 质量分数、半纤维素质量分数、纤维素质量分数、木质素质量分数、碳氮比);结果参数(TS 降解率、最大 VFAs 质量浓度、总产气量)。为了扩大统计分析的代表性,通过特征值选取了 PC1、PC2 两个主要成分,解释了数据集 91% 的总方差。两个主成分方程为

$$P_{C1(56.4\%)} = -0.150A + 0.054B + 0.154C + 0.154D + 0.155E + 0.15F + 0.069G + 0.061H - 0.045I + 0.131J + 0.112K \quad (2)$$

$$P_{C2(20.8\%)} = 0.147A + 0.39B - 0.091C - 0.091D + 0.044E + 0.066F - 0.223G + 0.373H + 0.131I - 0.068J + 0.174K \quad (3)$$

式中 A——青贮时间 B——压缩比
C——TS 质量分数 D——VS 质量分数
E——纤维素质量分数
F——半纤维素质量分数

G——木质素质量分数 H——TS 碳氮比
I——TS 降解率
J——最大 VFAs 质量浓度
K——总产气量

对 PC1 分析可知,半纤维素质量分数、纤维素质量分数、TS 质量分数、VS 质量分数、最大 VFAs 质量浓度、总产气量与 PC1 之间有强正相关性,各参数之间的相关性在 70% 以上(图 7)。青贮时间和 TS 质量分数、VS 质量分数、纤维素质量分数、半纤维素质量分数呈负相关性,相关系数分别为 -0.948、-0.946、-0.871、-0.861;总产气量与半纤维素质量分数、纤维素质量分数呈正相关关系,相

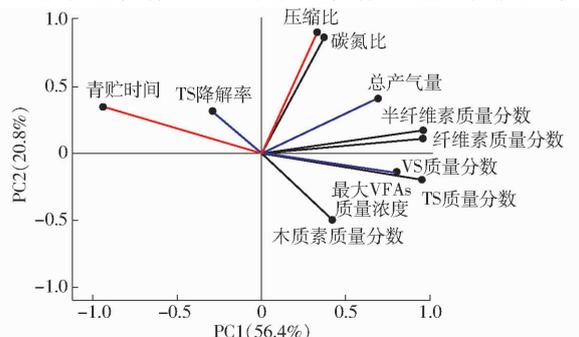


图 7 主成分分析 (PCA)

Fig. 7 Principal component analysis

关系数分别为 0.716、0.635。青贮时间与 PC1 有明显的负相关性,这表明青贮时间越长,TS、VS、纤维素、半纤维素质量分数越低,半纤维素和纤维素质量分数的下降,最终使总产气量降低。同时压缩比与 TS 质量分数、VS 质量分数、纤维素质量分数、半纤维素质量分数、木质素质量分数、总产气量呈正相关关系,说明压缩可防止贮存过程中玉米秸秆的有机质流失,并对产气量有着促进作用。

3 结论

(1)随青贮时间延长,收获后的玉米秸秆 TS 和 VS 质量分数下降,质量损失增大,机械压缩能有效阻止其 TS 和 VS 质量分数的下降。青贮时间越长,高密度机械压缩对降低青贮期质量损失的作用越明

显,青贮 300 d 组在 1:6 压缩比时 TS 和 VS 质量分数最高,分别为对照组的 2.2、2.9 倍。对于秸秆只需要短时间青贮的情况,则可采用 1:3 较小比例进行压缩,在达到青贮目的的同时可降低能耗;若需要长久时间的青贮,则可采用 1:4、1:5 等较高压缩比。

(2)青贮 300 d 的未压缩组累计产气量仅有 2.3 mL/g,而 1:6 压缩组累计产气量达 200.3 mL/g,机械压缩能有效保证玉米秸秆的产气量。延长青贮时间会显著降低沼气产量,在 1:6 压缩比条件下,青贮 7、40、300 d 的累计产气量分别为 364.9、282.9、200.3 mL/g。青贮时间越久,提高压缩比对产气量促进效果越明显,青贮 7 d 时,仅有 1:6 压缩比的累计产气量显著增加;当青贮 40 d 和 300 d 时,各压缩比的产气量均显著高于对照未压缩组 ($P \leq 0.05$)。

参 考 文 献

- [1] 艾平,田启欢,席江,等. 产酸沼渣再利用稻秸两级联合产酸工艺研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1):292-298. AI Ping, TIAN Qihuan, XI Jiang, et al. VFAs production technology by two-stage fermentation from rice straw based on digestate reuse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):292-298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190132&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.032. (in Chinese)
- [2] XIA T, HUANG H, WU G, et al. The characteristic changes of rice straw fibers in anaerobic digestion and its effect on rice straw-reinforced composites[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 121:73-79.
- [3] 王殿龙,艾平,鄢烈亮,等. 稀酸稀碱预处理的稻秸两步厌氧发酵性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2):168-175,180. WANG Dianlong, AI Ping, YAN Lieliang, et al. Property analysis of two-step anaerobic digestion of rice straw pretreated by dilute acid and dilute alkali[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):168-175, 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150225&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.025. (in Chinese)
- [4] 贾晶霞,梁宝忠,王艳红,等. 不同汽爆预处理对干玉米秸秆青贮效果的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20):192-198. JIA Jingxia, LIANG Baozhong, WANG Yanhong, et al. Effect of different steam explosion pretreatment on silage effect of dry corn stover[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20):192-198. (in Chinese)
- [5] WEINBERG Z G, ASHBELL G. Engineering aspects of ensiling[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 13(2):181-188.
- [6] AMBYE M. Ensiling as biological pretreatment of grass (*Festulium Hykor*): the effect of composition, dry matter, and inocula on cellulose convertibility[J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 58(4):303-312.
- [7] GALLEGOS D, WEDWITSCHKA H, MOELLER L, et al. Mixed silage of *Elodea* and wheat straw as a substrate for energy production in anaerobic digestion plants[J/OL]. Energy, Sustainability and Society, 2018, 8(7). <http://doi.org/10.1186/S13705-018-0148-1>.
- [8] 段娜,林聪,韩芳,等. 不同预处理方式对秸秆厌氧消化特性的影响[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12):2582-2587. DUAN Na, LIN Cong, HAN Fang, et al. Effects of different pretreatment methods on anaerobic digestion characteristics of straw[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(12):2582-2587. (in Chinese)
- [9] GAO R, YUAN X, ZHU W, et al. Methane yield through anaerobic digestion for various maize varieties in China[J]. Bioresource Technology, 2012, 118(8):611-614.
- [10] MAHNERT P, HEIERMANN M, LINKE B. Batch and semi-continuous biogas production from different grass species[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 2005, 7: EE 05 010.
- [11] PALARINEN O, LEHTOMAKI A, RISSANEN S, et al. Storing energy crops for methane production: effects of solids content and biological additive[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15):7074-7082.
- [12] 王丹,杨中平. 全株玉米秸秆压缩打捆袋装青贮技术的研究[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(1):177-179. WANG Dan, YANG Zhongping. Reserch on technique for compressed packaged silage of whole-plant corn stalk[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(1):177-179. (in Chinese)
- [13] ELLIOTT A, MAHMOOD T. Comparison of mechanical pretreatment methods for the enhancement of anaerobic digestion of pulp and paper waste activated sludge[J]. Water Environment Research, 2012, 84(6):497-505.

- [14] HERRMANN C, IDLER C, HERRMANN M. Improving aerobic stability and biogas production of maize silage using silage additives[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 197:393 – 403.
- [15] WANG Y, WU K, SUN Y. Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91(1):153 – 162.
- [16] FRANCO B T, PIERRE B, BAYARD R. Ensiling for biogas production: critical parameters. A review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 94(11):94 – 104.
- [17] ACHKAR J H E, LENDORMI T, HOBAIKA Z, et al. Anaerobic digestion of nine varieties of grape pomace: correlation between biochemical composition and methane production[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2017, 107: 335 – 344.
- [18] RISBERG K, CEDERLUND H, PELL M, et al. Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure, chemical composition and effects on soil microbial activity[J]. *Waste Management*, 2017, 61(3):529 – 538.
- [19] CHAO Z, SHAO Q J, MA Z Q, et al. Physical and chemical characterizations of corn stalk resulting from hydrogen peroxide presoaking prior to ammonia fiber expansion pretreatment[J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 83(2):86 – 93.
- [20] 宁静, 朱葛夫, 吕楠, 等. 碳氮比对猪粪与玉米秸秆混合厌氧消化产沼气性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(增刊):93 – 98.
NING Jing, ZHU Gefu, LÜ Nan, et al. Effects of C/N ratio on biogas production by anaerobic co-digestion of pig manure and corn straw[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(Supp.):93 – 98. (in Chinese)
- [21] MOSET V, XAVIER C D A N, HENRIK B M, et al. Optimization of methane yield by using straw briquettes-influence of additives and mold size[J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 74(11):925 – 932.
- [22] 郭大亮, 王林芳, 张维亮, 等. 基于 TG – FTIR 的雷尼镍催化乙醇木质素热解特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(1):290 – 295.
GUO Daliang, WANG Linfang, ZHANG Weiliang, et al. Raney nickel catalyzed pyrolysis mechanism of ethanol organosolv lignin based on TG – FTIR[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1):290 – 295. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180136&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.036. (in Chinese)
- [23] ACHKAR J, LENDORMI T, HOBAIKA Z, et al. Anaerobic digestion of nine varieties of grape pomace: correlation between biochemical composition and methane production[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2017, 107(12): 335 – 344.