

汽爆预处理对废弃烤后烟叶产甲烷潜力的影响

黄弘毅, 薛寒光, 李超, 黎娟, 王冠华, 邵思

引用本文:

黄弘毅, 薛寒光, 李超, 等. 汽爆预处理对废弃烤后烟叶产甲烷潜力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(8): 1854–1861.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0310>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碱预处理稻秆与猪粪混合厌氧发酵特性研究

付嘉琦, 夏嵩, 陈小平, 付尹宣, 晏恒, 吴九九

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1255–1261 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1498>

蒸汽爆破/氧化钙联合预处理对水稻秸秆厌氧干发酵影响研究

王星, 李强, 周正, 贺静, 邓雅月, 张敏, 尹小波

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 394–400 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1387>

醋糟与猪粪、鸡粪不同配比的厌氧共消化产气潜力研究

周冠男, 陈琳, 郑涛, 周政忠, 袁浩然

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1357–1364 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1329>

麦秸生物炭添加对猪粪中温厌氧发酵产气特性的影响

许彩云, 靳红梅, 常志州, 杜静, 黄红英, 艾玉春, 周立祥

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1167–1172 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.020>

三种湿地植物厌氧发酵产甲烷特性及产物稳定性研究

夏嵩, 付嘉琦, 付尹宣, 晏恒, 陈小平, 吴九九

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 2061–2066 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄弘毅, 薛寒光, 李超, 等. 汽爆预处理对废弃烤后烟叶产甲烷潜力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1854–1861.

HUANG Hong-yi, XUE Han-guang, LI Chao, et al. Assessment of biomethane production from cured tobacco leaves using steam explosion pretreatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1854–1861.



开放科学 OSID

汽爆预处理对废弃烤后烟叶产甲烷潜力的影响

黄弘毅^{1,2}, 薛寒光², 李超^{2,3*}, 黎娟^{1,2}, 王冠华⁴, 邵思⁵

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 湖南碧臣环境能源有限公司, 长沙 410100; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 5. 农业农村部规划设计研究院, 农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125)

摘要:为资源化利用涉烟有机废弃物,以废弃烤后烟叶为底物进行了中温厌氧发酵实验,通过对比研究蒸汽爆破预处理及5种汽爆条件对烤后烟叶产甲烷潜力的影响,探讨汽爆在烤后烟叶厌氧发酵中应用的可行性。结果表明:未处理烤后烟叶L0的生化产甲烷潜力值高于绝大多数木质纤维素类废弃物,达到了252.7 mL·g⁻¹ VS,且产气周期短,是优良的发酵原料;烤后烟叶在汽爆过程中发生固液组分分离,液体糖难以完全回收进而影响产气。与L0相比,汽爆后烟叶的生化产甲烷潜力均有下降,L1~L5分别降低了11.6%、23.0%、24.0%、22.4%及26.3%。对于烤后烟叶,尽管汽爆预处理能打开物料结构,但也会导致液体糖分大量流失,甲烷产量下降。综合考虑产品价值和处理能耗等因素,在实际应用中直接将烤后烟叶进行厌氧发酵是更优的选择。

关键词:厌氧发酵;烤后烟叶;蒸汽爆破;产甲烷潜力

中图分类号:X795 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)08-1854-08 doi:10.11654/jaes.2020-0310

Assessment of biomethane production from cured tobacco leaves using steam explosion pretreatment

HUANG Hong-yi^{1,2}, XUE Han-guang², LI Chao^{2,3*}, LI Juan^{1,2}, WANG Guan-hua⁴, SHAO Si⁵

(1. College of Agronomy, Agricultural University of Hunan, Changsha 410128, China; 2. Hunan BISEN Environmental & Energy Co., Ltd, Changsha 410100, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 5. Chinese Academy of Agricultural Engineering Planning & Design, Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: For utilizing organic waste of tobacco, discarded and cured tobacco leaves were subjected to medium-temperature anaerobic fermentation with steam explosion pretreatment. By comparing the biochemical methane potential (BMP) of cured tobacco in five different steam explosion gradients, the feasibility of steam explosion in cured tobacco anaerobic applications is discussed. The results show that the BMP value of untreated cured tobacco leaves (L0) is the highest, reaching 252.7 mL·g⁻¹ VS, which is higher than most lignocellulosic wastes. Moreover, the methane production cycle is short, which means that it is a suitable material for fermentation. In the process of steam explosion, solid and liquid components of tobacco are separated and liquid sugar precipitation is hard to recover completely, resulting in the loss of part of the sugar that can be used to produce methane. Consequently, it is not favorable for methane production. Compared with that of untreated tobacco leaves (L0), the BMP of all tobacco samples after the steam explosion decreased; L1~L5 decreased by 11.6%, 23.0%,

收稿日期:2020-03-19 录用日期:2020-04-26

作者简介:黄弘毅(1996—),男,湖南攸县人,硕士研究生,研究方向为涉烟废弃物厌氧消化处理。E-mail:15084840759@163.com

*通信作者:李超 E-mail:chao.li@novaskantek.com

基金项目:湖南省“湖湘青年英才”计划项目(2018RS3114);湖南省重点领域研发计划项目(2019NK2032);长沙市科技计划项目(长科发[2019]68号-kh1902215)

Project supported: The Hunan (Hu-Xiang) Youth Talent Program(2018RS3114); The Key Areas of Research and Development Program of Hunan Province(2019NK2032); The Science and Technology Program of Changsha(kh1902215)

24.0%, 22.4%, and 26.3%, respectively. Although steam explosion pretreatment can open the material structure, it leads to a large loss of liquid sugar and decrease in methane production. Considering the value of the product and energy consumption of the pretreatment, it is better to directly use cured tobacco for anaerobic fermentation without steam explosion treatments, in practical applications.

Keywords: anaerobic fermentation; cured tobacco leaf; steam explosion; biochemical methane potential

我国是全球最大的烟草生产国和消费国,烟草行业在我国国民经济中占据重要地位,2018年全国烟叶产量达2 241万t,实现工商税利总额1.15万亿元^[1]。在烟草的种植、生产和加工过程中会产生两大类废弃物:一是烟田废弃物,包括底脚叶、烟秆及烟花;二是卷烟原料废弃物,指未达到收购标准的烤后烟及废弃的库存烟。在烟草工业生产中,为满足烟叶气味需求,在特定的温湿度条件下对烟叶进行烘烤,使其内部化学成分达到协调的工业用烟为烤后烟。在实际生产中,烟叶的烘烤特性差异大,部分未达到收购标准的烤烟及烤后碎烟、烟末、废烟梗等不能再用于卷烟生产,大部分被粉碎毁形处理^[2]。然而,这些烤后烟废弃物尚有开发利用的价值,若能合理资源化利用,不但可以减少对环境的污染,还能产生经济效益。

厌氧生物处理法因其能耗低、环保性高、处理量大等特点,被认为是处理烟叶废弃物的有效方法之一。近年来,厌氧发酵技术处理烟草废弃物的研究已有诸多报道,杨斌等^[3]用废弃鲜烟叶进行了厌氧发酵,由于其低C/N和烟碱等因素,烟叶产气较低且沼气甲烷含量低,可将其与畜牧粪便等发酵原料混合来提升烟叶发酵效果。Liu等^[4]的研究表明,烟草秸秆与麦秸、猪粪共发酵后具有较好的产甲烷潜力,且通过高温厌氧发酵能有效灭活烟草内部的病原物,有利于后续还田。现有文献关于涉烟废弃物厌氧处理的研究主要集中在烟田废弃物,针对烤后烟废弃物厌氧处理、资源化利用的研究还很少。已有研究表明,烟叶在烘烤过程中淀粉会大量转化为糖类物质,总糖量高达25%~35%^[5-6],可作为厌氧发酵的重要原料^[7]。

烤后烟叶是木质纤维素生物质,在木质纤维素生物质中,木质素与半纤维素以共价键的形式紧密结合并包裹着纤维素,形成了复杂的立体结构^[8],这种特殊结构使纤维素酶难以直接作用于纤维素及半纤维素,故这类生物质在厌氧发酵中的可降解性不高。对其进行厌氧发酵前,一般需要通过预处理打开其内部结构^[9-10];此外,烟草还具有特殊的生物碱烟碱,其对厌氧发酵有明显的抑制作用^[11]。研究表明烟碱在特定条件下易与水蒸气共挥发^[12],作为预处理手段之

一,蒸汽爆破利用高温高压水蒸气处理纤维材料,可能会促进烟碱的释放;且蒸汽爆破对纤维素、半纤维素和木质素间的缠绕结构具有显著的破坏作用,是一种有效的预处理方式^[13-14]。

物料生化产甲烷潜力(Biochemical methane potential, BMP)是指单位有机物料在厌氧条件下发酵产生甲烷气体的数量^[15]。产甲烷潜力分析对于了解有机物料沼气发酵的效率和其过程稳定性都具有十分重要的意义。本研究通过对废弃烤后烟进行产甲烷潜力测试,研究了不同汽爆条件处理后烤后烟叶产甲烷量和产甲烷速率的变化,以期探索汽爆在烤后烟叶厌氧应用中的可行性,为烤后烟叶的厌氧发酵处理提供理论基础,并为涉烟有机废料的资源化处理处置工作提供可行的技术方案。

1 材料与方法

1.1 实验材料

原烟叶取自湖南省郴州市桂阳县白云村,品种为湘烟5号。样品经烘烤后,手动裁剪为边长30 mm的正方形薄片,并放入4℃环境下冷藏备用。

实验中使用的接种物为北京市小红门污水处理厂提供的污水厂原泥。实验开始前,将接种物在37℃恒温水浴中培养一周以减少内源性生物气产生,接种物的pH为7.42,总固体含量(Total solid, TS)为8.78%,挥发性固体含量(Volatile solid, VS)为3.64%。

1.2 实验装置

采用蒸汽爆破预处理系统(QBS-2008,鹤壁正道生物能源有限公司)进行汽爆预处理。系统由反应室、接受室和蒸汽发生器组成,汽爆反应室容积为5 L。BMP实验采用全自动甲烷潜力测试仪(MultiTalent 203,碧普华瑞环境技术(北京)有限公司)进行甲烷潜力测试(图1)。系统由厌氧消化单元、CO₂吸收单元和气体计量单元3个部分构成。厌氧消化单元包括15个配备了全自动内置搅拌系统的650 mL血清瓶(有效容积400 mL)和控温水浴槽;CO₂吸收单元包括15个100 mL血清瓶,其中装有80 mL 3 mol·L⁻¹的NaOH溶液以吸收沼气中的CO₂;气体计量单元配备

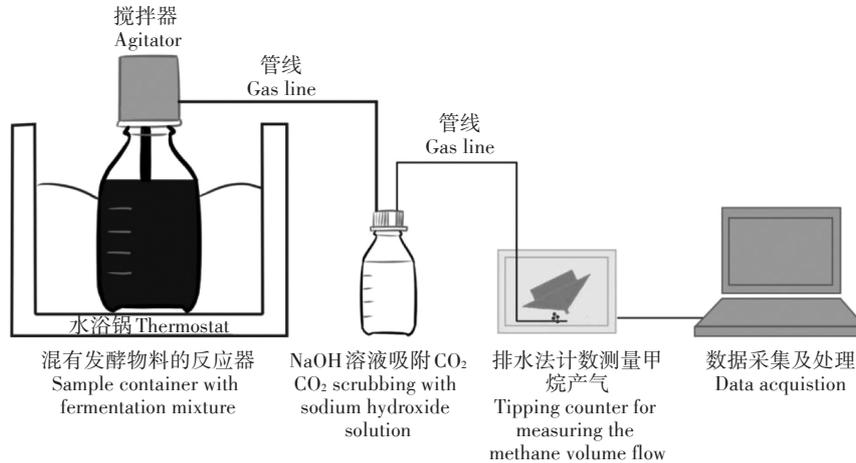


图1 MultiTalent 甲烷潜力测试系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of the biomethane potential test analyzer-MultiTalent

了15个全自动微量气体流量计及自动采集系统,通过基于实时嵌入式操作系统的上位机及应用程序监控下位机的实验数据,从而实现对下位气体流量计的数据采集及分析存储。

1.3 实验方法

将裁剪好的约260 g的样品分批加入蒸汽爆破反应器中,设定3个压力值(0.5、0.8、1.2 MPa)和3个保压时间(3、5、10 min),排列成不同的5个组合(表1),未处理烟叶作为对照(L0)。将蒸汽发生器供应的高压蒸汽分别注入反应器内,直到达到压力设定值,在达到设定保压时间后,通过打开球阀使样品突然爆破进入接受室。预处理后,样品水分含量显著增加,所有预处理后样品在55℃下干燥过夜以便进一步使用。

表1 蒸汽爆破实验设置表

Table 1 Steam-explosion pretreatment experimental design

处理 Treatments	压力 Pressure/MPa	时间 Time/min
L1	0.5	5
L2	0.8	5
L3	1.2	3
L4	1.2	5
L5	1.2	10

汽爆后样品干燥过夜后,用高速多功能粉碎机磨碎过60目筛,放置在4℃下低温保存用于相关化学指标、红外光谱(FTIR)及产甲烷潜力测定。

BMP实验的发酵单元水浴槽温度控制在 37 ± 1 ℃。实验设置空白组(纯污泥)、对照组(纤维素)及各个处理组(L0~L5),每组实验均设置3个平行。实验中,接种物VS:物料VS(Inoculum substrate ratio,

ISR)为2:1,设计500 mL发酵瓶总进料400 g,物料按比例装进发酵瓶后手动混匀,装上橡胶塞及电机密封后按顺序放入37℃恒温水槽内并连接电机电缆,各单元之间用聚乙烯软管进行连接,设置搅拌周期为开启300 s,停止1500 s,搅拌速率为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。实验以厌氧消化反应瓶的当日产甲烷量小于之前累计产甲烷量的1%为终点。

1.4 分析方法

烟叶TS和VS质量分数采用质量法进行测定^[16]。纤维三组分及糠醛采用高效液相色谱^[17](HPLC)对滤液进行测定。色谱条件:Aminex Hpx-87H离子交换色谱柱(美国伯乐公司),柱温65℃,流动相 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$,流速 $0.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;葡萄糖、木糖和阿拉伯糖采用示差折光检测器,糠醛采用紫外检测器(波长280 nm),烟碱采用紫外分光光度法进行测定^[18],傅里叶红外光谱(FTIR)分析采用固体溴化钾压片法^[19],总糖及还原糖含量采用流动分析法进行测定^[20]。

2 结果与讨论

2.1 不同汽爆条件下烟叶纤维组分含量

烤后烟叶在5种汽爆条件处理后的化学成分含量如表2所示。汽爆后烟叶各化学成分有显著差异。在蒸汽爆破过程中,物理和化学作用使半纤维素水解成单糖和低聚糖,打开了由纤维素、半纤维素及木质素组成的复杂立体结构,提高了酶对纤维素的可及性^[21]。经检测,L2~L5的纤维素含量低于L0,在相同保压时间内汽爆压力越高纤维素含量越低,可能是爆破过程中纤维素在高温高压情况下受到了一定程度的降解,导致其绝对含量降低。与纤维素相比,半纤

表2 烤后烟叶汽爆前后化学成分含量

Table 2 Chemical composition of cured tobacco leaves

处理 Treatments	纤维素 Cellulose/%	半纤维素 Hemicellulose/%	木质素 Lignin/%	糠醛 Furfural/%	烟碱 Nicotine/%
L0	17.52±0.33	19.96±0.28	19.09±0.34	0.067±0.003	1.71±0.09
L1	17.79±0.45a	18.29±0.24b	25.23±0.40c	0.066±0.001a	1.76±0.07b
L2	16.44±0.52b	18.92±0.55b	26.90±0.45c	0.066±0.001a	1.95±0.08c
L3	15.53±0.13c	18.89±0.20b	29.54±0.04c	0.071±0.002c	2.06±0.09c
L4	15.28±0.15c	17.52±0.87c	27.02±0.05c	0.072±0.003c	1.85±0.05c
L5	15.72±0.43c	15.08±0.05c	31.11±0.39c	0.113±0.025c	2.10±0.04c

注:数据后的字母a表示和对照差异不显著,b表示差异显著($P<0.05$),c表示差异极显著($P<0.01$)。

Note: Letter a indicated that there were no significant difference between the data and control; b, there were significant different ($P<0.05$); c, there were extremely significant difference ($P<0.01$).

纤维素作为非晶体组分在高温高压下更易转化为糖类,与L0相比,汽爆显著降低了L1~L5中半纤维素的含量,在1.2 MPa下,随着保压时间的增加,半纤维素含量明显呈下降趋势,L3~L5分别下降了5.4%、12.2%、24.4%,这表明汽爆预处理能打开烟叶内部结构,有效降解半纤维素。汽爆后烟叶中木质素的相对含量有明显的上升,L5处理中木质素含量最高,相比L0提升了62.9%,可能是汽爆过程中其他成分析出而木质素未发生较大变化,导致含量相对升高^[22];另有研究指出,蒸汽爆破可以裂解半纤维素和木质素之间的结合,导致类木质素物质“假木质素”的增加^[23]。

随着汽爆强度增加,物料颜色逐渐加深,可能是降解的糖在汽爆过程中又进一步降解为糠醛等抑制类物质^[24]。据文献报道,糠醛来自戊糖的脱水反应,这个过程在压力和温度升高后更容易进行^[25]。由表2可知,相比L0~L4处理,L5高温高压处理下烟叶内糠醛含量明显增加。与L0相比,L1~L5烟碱含量都有所升高。可能是汽爆在破坏细胞壁的过程中烟碱并

未随蒸汽释放,导致汽爆后烟叶烟碱相对含量增加,烟碱含量的增加在一定程度上会抑制烟叶产气。整体来看,L5的抑制程度高于其他处理。

2.2 不同汽爆条件下烟叶的傅里叶红外光谱

蒸汽爆破过程中,烤后烟叶内部发生了相应的化学变化,通过分析傅里叶变换红外光谱中各个官能团吸收强度的变化,可以进一步判断汽爆对烟叶结构的影响。据文献报道^[26],纤维类原料的红外光谱图中,纤维素吸收峰为2 920、1 425、1 374、897 cm^{-1} ; 1 730 cm^{-1} 附近的C=O伸缩振动为半纤维素吸收峰; 1 515 cm^{-1} 和1 650 cm^{-1} 为木质素特征吸收峰。

图2为各处理的红外光谱图。L0在1 730 cm^{-1} 处有明显的吸收峰,汽爆后烟叶在该处的吸收峰减弱近乎消失,这表明高温高压下半纤维素发生了脱乙酰化降解,使其含量显著降低。汽爆后样品在2 920 cm^{-1} 和897 cm^{-1} 附近的特征峰吸收强度变化不大,在1 425 cm^{-1} 和1 374 cm^{-1} 附近的吸收峰减弱,这意味着纤维素含量略有降低。在1 515 cm^{-1} 和1 650 cm^{-1} 附近,相

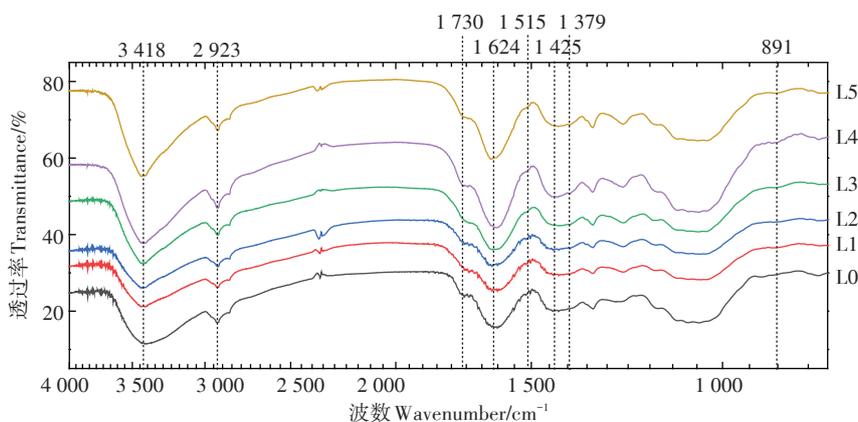


图2 烤后烟叶预处理傅里叶红外光谱图

Figure 2 FTIR spectra of raw and steam explosion pretreated cured tobacco leaves

比L0, L1~L5的特征吸收峰有所加强,表明木质素相对含量增加,这与表2的结果相一致。

2.3 烟叶糖含量测定

随汽爆强度上升,处理后烟叶趋于浆状,析出更多液体成分。在汽爆过程中,由于水蒸气和热的联合作用导致了纤维素原料的类酸性降解及热降解,半纤维素发生部分自水解转化成单糖和低聚物,部分木质素降解成小分子低聚物随水溶出^[27]。同时,纤维素聚合度下降。高温高压条件下,半纤维素链上水解产生的乙酰基生成乙酸又加剧了半纤维素的糖苷键和木质素上 β -O-4芳基醚键的水解^[28]。故处理强度越大,水溶性物质溶出越多,这与实验结果一致。汽爆处理后,固液组分分离程度高,回收液体时会造成一定程度的损失。有研究表明,物料汽爆过程析出的液体中糖含量高,这是发酵产气的重要组成部分。Thungkin等^[29]发现,在4种不同的汽爆条件下,汽爆析出液中的总糖含量高达 $19.72\sim 36.35\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;Capecchi等^[30]的研究表明,不同汽爆处理后析出的液体所产甲烷量可达 $137.5\sim 300.5\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$ 。

为进一步确定析出液体组分对后续产气的影响,用流动分析仪对所有烟叶进行了糖含量测定,烟叶糖含量如图3所示。由图可知,汽爆后烟叶的糖含量均有下降,相比L0,低汽爆处理L1的还原性糖和非还原性糖下降了23.1%和22.4%,而高汽爆处理L2~L5糖含量显著下降,还原性糖和非还原性糖分别下降了61.3%~66.6%和60.4%~66.0%。研究表明烟叶在烘烤过程中组织结构变疏松^[31],且淀粉大量转化为糖类物质,显著提升了烟叶可溶性糖含量。相比其他木质纤维素类物料,这可能使烤后烟叶在汽爆过程中更易发生物理化学变化,导致大量糖分溶入液体组分中并随之析出,使汽爆后烟叶的产气受到影响。

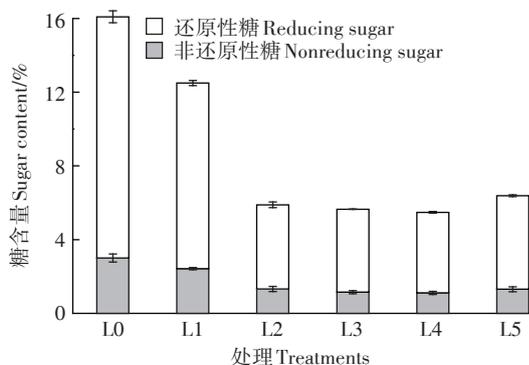


图3 烤后烟叶糖含量

Figure 3 Sugar content of cured tobacco leaves

2.4 甲烷潜力测试分析结果

基于汽爆预处理能够打开木质纤维素生物质内部的复合结构且有利于酶解,实验进一步考察了汽爆预处理对烤后烟叶产甲烷潜力的影响。烤后烟叶的单位产甲烷量及日产甲烷量见图4和图5。由图可知,整个发酵过程历经了3个峰值,汽爆后烟叶L1~L5的BMP均低于未汽爆烟叶L0,这与其他研究形成了对比^[32-33]。相比L0, L1~L5的BMP下降了11.6%~26.3%;其中低强度汽爆处理L1的产甲烷潜力下降率为11.6%,L2~L5高强度汽爆处理下降率在22.4%~26.3%范围间,显著高于L1。根据实验结果可知,无论是低强度或高强度汽爆,预处理均没有提高烤后烟叶的产甲烷潜力,这表明汽爆预处理并不能提高烤后烟叶的产甲烷潜力,反而会起到负面作用,且汽爆强度越高,对应处理后的烟叶产甲烷潜力下降越快。

经分析发现,烟叶BMP值与糖含量变化趋势一致,可以推断,汽爆后烟叶糖含量的流失是产气下降的主要原因。由于烤后烟叶结构疏松及含糖量高等

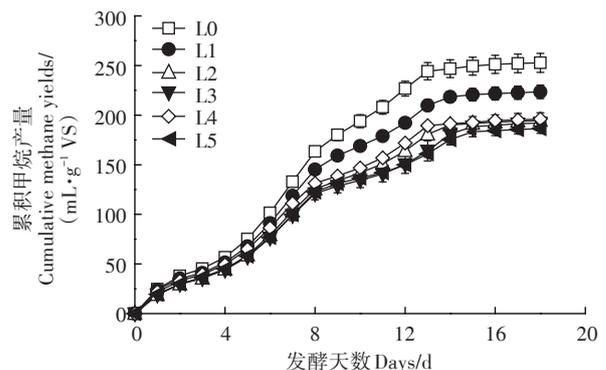


图4 烤后烟叶的产甲烷过程

Figure 4 Accumulated methane production of cured tobacco leaves

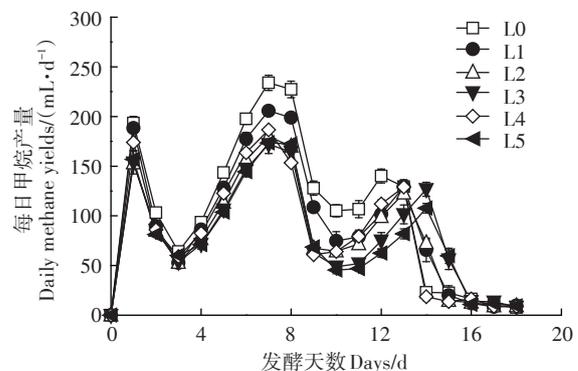


图5 烤后烟叶日产甲烷量

Figure 5 Daily methane production of cured tobacco leaves

特性,使得烤后烟叶在汽爆过程中极易发生物理化学变化,大量糖分溶入液体组分中并随之析出,降低了汽爆后样品中的糖含量,进而降低了产气量。但从另外的角度看,通过改进汽爆工艺来解决组分回收率低的问题可能会使蒸汽爆破成为烤后烟叶厌氧资源化的一种新途径。有研究表明,木质素相对含量的增加会阻碍微生物与物料接触,降低发酵产气量^[23]。本研究中,汽爆后烟叶木质素相对含量均明显上升,故木质素相对含量的增加也是导致产气量下降的原因之一。所有处理中L5产气最低,可能也与该处理中高糠醛和高烟碱的抑制有关。

值得一提的是,未处理烟叶L0每克挥发性固体产甲烷量为252.7 mL,这表明烤后烟叶不仅能够顺利发酵,且BMP值高于大多数木质纤维素类废弃物,甚至高于一些物料预处理后的产甲烷潜力值,如:Li等^[34]的研究发现,未经预处理的湘南荻芒属能源作物的产甲烷潜力值为181.7 mL·g⁻¹ VS;李雪等^[35]对不同的农作物秸秆进行了厌氧发酵,发现其中青贮玉米秸秆产沼气潜力最高,为140.08 mL·g⁻¹ VS;张含^[36]用不同浓度的碱溶液对棉花秸秆进行预处理时发现,在浓度为1.5%的NaOH溶液作用下秸秆产气最高,单位挥发性固体产气为178.6 mL·g⁻¹ VS。

T₉₀是厌氧工艺中一个非常重要的参数,指发酵过程中累积产气量达到总产气量90%所用的时间。本研究中,L0~L5的T₉₀均在13 d左右,远小于一般农业废弃物的T₉₀。Nges等^[37]的研究发现芒草在不同预处理条件下的T₉₀在17~42 d之间;王星^[38]对水稻秸秆进行了不同的预处理,其发酵周期在73 d左右,T₉₀在55 d左右。可见,烤后烟叶不仅单位产甲烷量高,且发酵周期较短,是优良的厌氧发酵原料。相比汽爆预处理后的烤后烟叶,未处理烤后烟叶没有糖分损失,其产气更高且能耗低,在实际应用中,直接利用烤后烟叶进行厌氧发酵是更好的选择。

3 结论

(1)未汽爆烤后烟叶L0每克挥发性固体产甲烷量为252.7 mL,高于大多数木质纤维素类废弃物,甚至高于一些预处理后物料的产甲烷潜力值;且本研究中烤后烟叶的产气周期短,是优良的厌氧发酵原料。

(2)汽爆预处理能够有效打开烤后烟叶内部结构,有利于酶解,但汽爆后烟叶的产甲烷潜力并没有提高,糖分极易溶于液体组分中并随之析出进而降低

了产气量;此外,本研究中预处理没有促进烟碱分离,烟碱并未随蒸汽释放出来,导致汽爆后物料中烟碱相对含量增加,在一定程度上抑制了发酵产气。未汽爆预处理的烟叶没有损失糖分产气更高。因此,实际应用中,直接利用烤后烟叶进行厌氧发酵会更好。后续,针对烟叶废弃物的汽爆预处理技术,可深入研究如何提高组分回收率及增强烟碱脱除效果,进一步优化汽爆预处理工艺。

(3)现有研究证明,烟草有机废弃物可通过厌氧发酵工艺实现资源化利用,厌氧发酵产生的沼渣沼液亦可作为生物有机肥直接利用。因此,厌氧技术可作为减少烟草工业废弃物污染的有效出路。基于我国烟草行业的生产流程与规模,可进一步开发小型烟草废弃物厌氧处理一体化设备,向烟农和涉烟企业推广并应用,在实现烟草废弃物资源化利用的同时,还可提高烟农经济收入,从而促进烟草种植业和烟草工业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 2018中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. State Statistics Bureau. 2018 China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [2] 张华. 涉烟废弃物毁形系统在复烤企业的应用[J]. 山东工业技术, 2018(23): 15, 9. ZHANG Hua. Application of smoke related waste destruction system in redrying enterprises[J]. *Shandong Industry Technology*, 2018 (23): 15, 9.
- [3] 杨斌, 李彦, 张无敌, 等. 废弃烟叶厌氧消化的实验探究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2012, 32(3): 28-32. YANG Bin, LI Yan, ZHANG Wu-di, et al. Experimental exploration on anaerobic digestion of waste tobacco leaves[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Science Edition)*, 2012, 32(3): 28-32.
- [4] Liu Y, Dong J, Liu G, et al. Co-digestion of tobacco waste with different agricultural biomass feedstocks and the inhibition of tobacco viruses by anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 189: 210-216.
- [5] 齐娜. 烟叶烘烤过程中主要物理参数及化学物质变化动态研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015. QI Na. Studies on the change of the main physical parameters and chemical dynamics during the tobacco curing[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015.
- [6] 赵会纳, 谢已书, 李章海, 等. 不同成熟度烟叶在散叶烘烤过程中主要化学成分的动态变化[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(4): 835-839. ZHAO Hui-na, XIE Yi-shu, LI Zhang-hai, et al. Dynamic changes of major chemical components in tobacco leaf of different maturity during loose leaves baking process[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2013, 52 (4): 835-839.

- [7] 王明. 生物质组成成分对厌氧发酵产甲烷的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
WANG Ming. Effect of biomass compositions on the anaerobic digestion for methane production[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.
- [8] 陈洪章, 李佐虎. 纤维素原料微生物与生物量全利用[J]. 生物技术通报, 2002(2): 25-29.
CHEN Hong-zhang, LI Zuo-hu. Lignocellulosical microorganisms and biomass total utilization[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2002(2): 25-29.
- [9] Guo P, Mochizuki K, Cheng W, et al. Effects of different pretreatment strategies on corn stalk acidogenic fermentation using a microbial consortium[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(16): 7526-7531.
- [10] 焦翔翔, 靳红燕, 王明明. 我国秸秆沼气预处理技术的研究及应用进展[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 29-33, 39.
JIAO Xiang-xiang, JIN Hong-yan, WANG Ming-ming. Research process of straw pretreatment for anaerobic fermentation production biogas in China[J]. *China Biogas*, 2011, 29(1): 29-33, 39.
- [11] 夏鸣, 汪云, 孙运兰. 烟草废弃物厌氧发酵产沼气的研究进展[J]. 中国新技术新产品, 2018(18): 90-91.
XIA Ming, WANG Yun, SUN Yun-lan. Research process of tobacco waste anaerobic fermentation for biogas production[J]. *New Technology and New Products of China*, 2018(18): 90-91.
- [12] 路绪旺, 崔鹏, 姚育翠. 二次萃取蒸馏法提取废次烟叶中烟碱的研究[J]. 应用化工, 2006, 35(1): 48-50, 53.
LU Xu-wang, CUI Peng, YAO Yu-cui. Study on extraction of nicotine from inferior tobacco by twice extraction and distillation method [J]. *Applied Chemical Industry*, 2006, 35(1): 48-50, 53.
- [13] Zhao Q H, Wang L, Chen H Z. Effect of novel pretreatment of steam explosion associated with ammonium sulfite process on enzymatic hydrolysis of corn straw[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2019, 189(2): 485-497.
- [14] Sui W J, Chen H Z. Study on loading coefficient in steam explosion process of corn stalk[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 534-542.
- [15] 成喜雨, 李超, 李兵, 等. 物料产甲烷潜力分析技术及设备评述[J]. 可再生能源, 2013, 31(5): 72-79.
CHENG Xi-yu, LI Chao, LI Bing, et al. Technologies and equipments used testing biochemical methane potential (BMP): A review[J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(5): 72-79.
- [16] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 536-537.
HE Yan-ling. Anaerobic biological treatment of waste water[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998: 536-537.
- [17] Larsson S, Palmqvist E, Bärbel Hahn-hägerdal, et al. The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1999, 24(3/4): 151-159.
- [18] 赵立红, 方敦煌. 连续流动分析法测定烟草中水溶性糖、烟碱、氯离子的比较研究[J]. 光谱实验室, 2007, 24(2): 224-230.
ZHAO Li-hong, FANG Dun-huang. Study on water-soluble sugars, nicotine and chlorion in tobacco by different continuous flow analyzers [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2007, 24(2): 224-230.
- [19] 齐凤海. 红外光谱分析样品制备方法[J]. 分析仪器, 2009(4): 83-86.
QI Feng-hai. Sample preparation methods for infrared spectrometric analysis[J]. *Analytical Instrumentation*, 2009(4): 83-86.
- [20] 杜瑞华, 周明松. 连续流动分析法在烟草分析中的应用[J]. 中国测试技术, 2007, 33(3): 76-78.
DU Rui-hua, ZHOU Ming-song. Summary of continuous flow analytical method used in tobacco analysis[J]. *China Measurement Technology*, 2007, 33(3): 76-78.
- [21] 张慧玲, 王志伟, 周中凯. 不同汽爆处理对藜麦秸秆化学组成及纤维结构的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(7): 105-112.
ZHANG Hui-ling, WANG Zhi-wei, ZHOU Zhong-kai. Influence of different steam explosion treatments on chemical composition and fiber structure of quinoa straw[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(7): 105-112.
- [22] 王玉, 周俊, 雍晓雨, 等. 汽爆预处理对水稻秸秆纤维结构的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(11): 319-324.
WANG Yu, ZHOU Jun, YONG Xiao-yu, et al. Effects of steam explosion pretreatment on the fiber structure of rice straw[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2014, 42(11): 319-324.
- [23] Shi Q C, Li Y Q, Li Y F, et al. Effects of steam explosion on lignocellulosic degradation of, and methane production from, corn stover by a co-cultured anaerobic fungus and methanogen[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121796.
- [24] 王许涛, 张百良, 宋安东, 等. 蒸汽爆破技术在秸秆厌氧发酵中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 189-192.
WANG Xu-tao, ZHANG Bai-liang, SONG An-dong, et al. Application of steam-exploded technology to anaerobic digestion of corn stover[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(8): 189-192.
- [25] Mamman A S, Lee J M, Kim Y C, et al. Furfural: Hemicellulose/xylo-sederived biochemical[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2008, 2(5): 438-454.
- [26] 陈嘉翔, 余家鸾. 植物纤维化学结构的研究方法[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1989.
CHEN Jia-xiang, YU Jia-luan. Methods for researching the chemical structure of plant fibers[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1989.
- [27] 陈洪章. 气相爆破技术及生物质炼制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
CHEN Hong-zhang. Gas explosion technology and biomass refining [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [28] Wang G H, Chen H Z. Enhanced lignin extraction process from steam exploded corn stalk[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 157: 93-101.
- [29] Thungkin P, Sittijunda S, Reungsang A. Sequential fermentation of hydrogen and methane from steam-exploded sugarcane bagasse hydrolysate[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(21): 9924-9934.
- [30] Capecchi L, Galbe M, Wallberg O, et al. Combined ethanol and methane production from switchgrass (*Panicum virgatum* L.) impregnated with lime prior to steam explosion[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016,

90:22-31.

- [31] 赵铭钦, 苏长涛, 姬小明, 等. 不同成熟度对烤后烟叶物理性状、化学成分和中性香气成分的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(3):146-150.
ZHAO Ming-qin, SU Chang-tao, JI Xiao-ming, et al. Effect of maturity on physical properties, chemical components and content of neutral aroma constituents in flue-cured tobacco[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(3):146-150.
- [32] Eom T, Chaiprapat S, Charnok B. Enhanced enzymatic hydrolysis and methane production from rubber wood waste using steam explosion[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235:231-239.
- [33] Theuretzbacher F, Lizasoain J, Lefever C, et al. Steam explosion pretreatment of wheat straw to improve methane yields: Investigation of the degradation kinetics of structural compounds during anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179:299-305.
- [34] Li C, Liu G J, Nges I A, et al. Enhanced biomethane production from miscanthus lutarioriparius using steam explosion pretreatment[J]. *Fuel*, 2016, 179.
- [35] 李雪, 张欣, 葛长明, 等. 不同秸秆厌氧发酵产沼气潜力研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6):496-499.
LI Xue, ZHANG Xin, GE Chang-ming, et al. Study on the potential of biogas production by anaerobic fermentation of different straw[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2016, 44(6):496-499.
- [36] 张含. 棉花秸秆预处理及厌氧消化产甲烷研究[D]. 北京:北京化工大学, 2018.
ZHANG Han. Research on pretreatment and methane production for cotton stalk during anaerobic digestion process[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [37] Nges I A, Li C, Wang B, et al. Physio-chemical pretreatments for improved methane potential of miscanthus lutarioriparius[J]. *Fuel*, 2016, 166:29-35.
- [38] 王星. 预处理对水稻秸秆/金针菇菌糠产沼气的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
WANG Xing. Research on effect of pretreatments on biogas yield of rice straw/mushroom residue[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.