

核桃壳生物炭对厌氧干发酵的影响*

张 振, 杨 红, 尹 芳**, 张无敌**, 赵兴玲, 王昌梅, 吴 凯, 柳 静

(云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500)

摘要:【目的】提高奶牛粪厌氧干发酵产气效率和探究生物炭对其影响效果。【方法】将核桃壳在 300、400、500 和 600 °C 下烧制成生物炭, 将生物炭加入干发酵体系中, 添加量为总固体(total solid, TS)质量的 4%, 发酵罐中总干物质质量占总发酵质量的 25%, 接种量为发酵反应物质总质量的 30%, 于中温(37±1)°C 下进行发酵试验并对生物炭及发酵料液进行电镜扫描。【结果】600H 组起到了良好的促进效果, 其发酵 VS 产甲烷量达(183.46±2.93) mL/g, 比对照组高 30.52%; 电镜扫描发现: 500H 组、600H 组和 CK 组的微生物菌群呈聚集现象。【结论】相对低温条件下制备的生物炭不利于干发酵, 500H 组和 600H 组生物炭有利于干发酵。本研究为干发酵中加入生物炭的相关研究提供了支持。

关键词: 干发酵; 奶牛粪; 生物炭

中图分类号: S 664.1; TS 216.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2020)05-0885-07

Effect of Walnut Shell Biochar on Dry Anaerobic Fermentation

ZHANG Zhen, YANG Hong, YIN Fang, ZHANG Wudi, ZHAO Xingling,

WANG Changmei, WU Kai, LIU Jing

(College of Energy and Environmental Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: [Purpose] To improve the gas production efficiency of dry anaerobic fermentation of cow manure and explore the effect of biochar on it. [Methods] The biochar made from walnut shell under different temperature gradients was added into the dry fermentation system. The amount of biochar was 4% of the total solid (TS), the amount of total dry matter in fermentation tank accounts for 25% of total fermentation quality, and the inoculation rate was 30% of the total fermentation weight. The fermentation experiment was carried out under the medium temperature (37±1)°C, and the biochar and fermentation broth were scanned by electron microscope. [Results] 600H group played a good role in promoting VS methane production, which was (183.46±2.93) mL/g, 30.52% higher than that of the control group. Election microscope showed that microbial community aggregated in 500H group, 600H group and control group. [Conclusion] The biochar prepared at relatively low temperature is not conducive to dry fermentation, and the biochar of 500H group and 600H group is conducive to dry fermentation. This study provides support for the research of adding biochar in dry fermentation.

Keywords: dry anaerobic fermentation; cow manure; biochar

收稿日期: 2020-01-31

修回日期: 2020-05-15

网络首发时间: 2020-09-24 09:50:23

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51366015); 西南地区可再生能源研究与开发协同创新中心(05300205020516009); 云南省应用基础研究计划青年项目(2018FD018)。

作者简介: 张振(1996—), 男, 云南禄劝人, 在读硕士研究生, 主要从事生物质能与环境工程研究。

E-mail: 773781336@qq.com

**通信作者 Corresponding authors: 尹芳(1967—), 女, 云南石屏人, 博士, 教授, 主要从事生物质能与环境工程的教学和研究。E-mail: yf6709@sina.com; 张无敌(1965—), 男, 云南石屏人, 学士, 研究员, 主要从事生物质能与环境工程的教学和研究。E-mail: wootichang@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.s.20200923.1049.002.html>



掠夺式农业生产方式使农用地污染日益严重，农业生态环境面临日益恶化的严峻形势^[1]。其中，畜牧业造成的面源污染起到了推波助澜的作用。中国作为农业大国，迅速发展的畜牧业产生的农业废弃物需要得到无害化和资源化处理。厌氧消化是无害化和资源化利用这些农业废弃物行之有效的方法^[2]。

厌氧消化又称沼气发酵，根据原料固体含量 (total solid, TS) 的不同，沼气发酵可以分为湿发酵 (TS<15%) 和干发酵 (TS>20%)^[3]。目前国内广泛应用的是湿发酵，而与湿发酵相比，干发酵具有耗水量小、沼液量少、沼渣营养物浓度高、运输成本低和发酵设备利用率高等优点^[4]。但同时干发酵在启动和运行时也存在一些难题，如易酸化 (VFA 产生过快)、启动慢、需要搅拌和产气不稳定。综合干发酵的优缺点，结合国外厌氧消化的发展历史来看，干发酵逐步取代湿发酵是厌氧发酵发展的方向之一。因此，干发酵相关研究值得更加深入的探讨。

在厌氧发酵中，生物炭作为外源添加剂具有以下优势：(1) 生物炭由于比表面积大、孔隙丰富，将生物炭添加至厌氧发酵体系可为厌氧微生物提供充足的增殖空间，富集优势菌群；(2) 生物炭可调节厌氧发酵中间代谢产物积累，避免发

酵过程中氨氮过高和挥发性有机酸过高而导致抑制产气；(3) 生物炭充当了电子传递媒介物质，提高电子传递效率从而提高了产甲烷速率^[5]。已有研究^[6-8]表明：生物炭促进了 *Geobacter metalireducens* 和 *Gebacter sulfurreducens* 的直接电子传递 (DIET)，最终提升了产甲烷量。此外，MU-MME 等^[9] 研究发现：生物炭可提高鸡粪、牛粪和藻类等混合物的产气潜力和甲烷含量。

核桃壳在不同温度条件下热裂解后制作成的生物炭有不同程度的炭结构，且核桃壳是一种资源量大且有很大利用前景的农业废弃物，故本研究尝试利用核桃壳在不同温度下烧制成的生物炭作为添加剂添加至厌氧干发酵体系，探究生物炭影响厌氧干发酵的程度和机理，可为厌氧干发酵中加入生物炭的相关研究提供支持。

1 材料与方法

1.1 原料和接种物

发酵原料奶牛粪取自石林县新希望牧场，经自然晾干后使用；核桃壳为大理漾濞县泡核桃，粉碎，筛选粒径 40~60 目的颗粒，在 105 ℃ 干燥箱中干燥 24 h 后作为制炭的原料备用；接种物由活性污泥和奶牛粪为底物长时间驯化而得。原料和接种物的基本特性见表 1。

表 1 奶牛粪和接种物特性
Tab. 1 Characteristics of cow manure and inoculum %

项目 item	总固体含量 total solid content	挥发性固体含量 volatile solid content	总氮含量 total nitrogen content	总磷含量 total phosphorus content	有机质含量 organic matter content
奶牛粪 cow manure	43.12±0.49	77.45±0.51	1.51	0.20	16.2
接种物 inoculum	11.25±0.21	64.31±0.28	0.18	未检测 no detection	未检测 no detection

1.2 试验设计

1.2.1 核桃壳生物炭的制作和电镜扫描

查阅资料可知：在不同温度条件下，核桃壳存有不同程度的炭结构，包括生物炭比表面积、孔径大小和表面功能基团都有所不同，其中 500 ℃ 下热解具有最大比表面积^[10]，设置每隔 100 ℃ 的温度梯度可使得烧制的生物炭存有不同程度的炭结构，故本研究将备用的核桃壳置于马弗炉中控制不同温度 (300、400、500 和 600 ℃)，采用限氧控温炭化法烧制 3 h，方法同黄华等^[11]，得到核桃壳生物炭。后将各核桃壳生物炭进行真空干

燥、拍照、粘样和喷金，在 5 kV 加速电压下，通过冷场发射扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi SU 8010, 日本) 放大 5000 倍，观察其结构，并通过 X 射线能谱 (EDS, 牛津 EDS-MAX 70) 分析该放大区域内表面以下 1 μm 范围内的元素组成及比例。

1.2.2 厌氧发酵试验

厌氧发酵试验装置^[10](图 1) 工作体积为 200 mL，接种量为发酵反应物质总质量的 30%，反应体系中 TS 为 (25±0.5)%。试验设置试验组、对照组 (CK) 和空白组，每组各设 3 个平行。试

验组由奶牛粪、接种物和生物炭组成, 4 个试验组 (不同温度) 分别记为 300H、400H、500H 和 600H 组, 核桃壳生物炭的添加量为发酵总 TS 的 4%; CK 组仅添加奶牛粪和接种物; 空白组仅添

加接种物和生物炭。各组密封后分别通 N_2 不低于 2 min, 保持良好的厌氧环境。放置于 $(37 \pm 1)^\circ C$ 水箱中水浴保温。

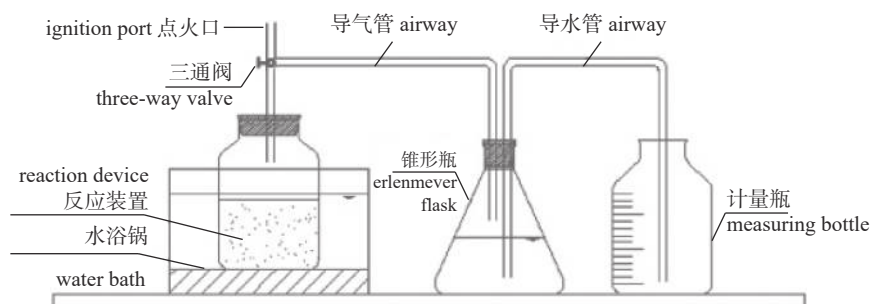


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental facility

试验前用恒温干燥箱和马弗炉以标准方法^[4]测定原料及接种物的 TS 和挥发性固体含量 (volatile solid, VS)。每天使用量筒定时测量图 1 计量瓶中水量, 以换算为日产沼气量。每天使用气象色谱仪 (福立 GC9700 II 型) 测定 CH_4 含量, 仪器采用 Porapak Q 不锈钢填充柱, 柱温 $80^\circ C$, 载气为氮气, 流速 30 mL/min, 进样室温度 $80^\circ C$, 检测室热导检测器 (TCD), 检测室温度 $120^\circ C$, 桥电流 120 mA。使用 Excel 和 Origin 软件整理发酵过程中产气相关数据并绘制甲烷含量、日产甲烷量和累计产甲烷量变化趋势图。累计产甲烷量由每天产甲烷量相加而得; TS 产甲烷量=累计产甲烷量/反应体系奶牛粪干物质的量; VS 产甲烷量=TS 产甲烷量/奶牛粪 VS。

1.2.3 部分反应体系微生物菌群电镜扫描

选取反应体系厌氧消化效果较好的试验组进行 SEM 电镜扫描, 方法同 1.2.1 节。取样时间为反应中期, 观察每个组别的表面形态特征、微生物数量和分布情况、有无团聚体等。

2 结果与分析

2.1 不同温度下烧制的生物炭电镜扫描及能谱图分析

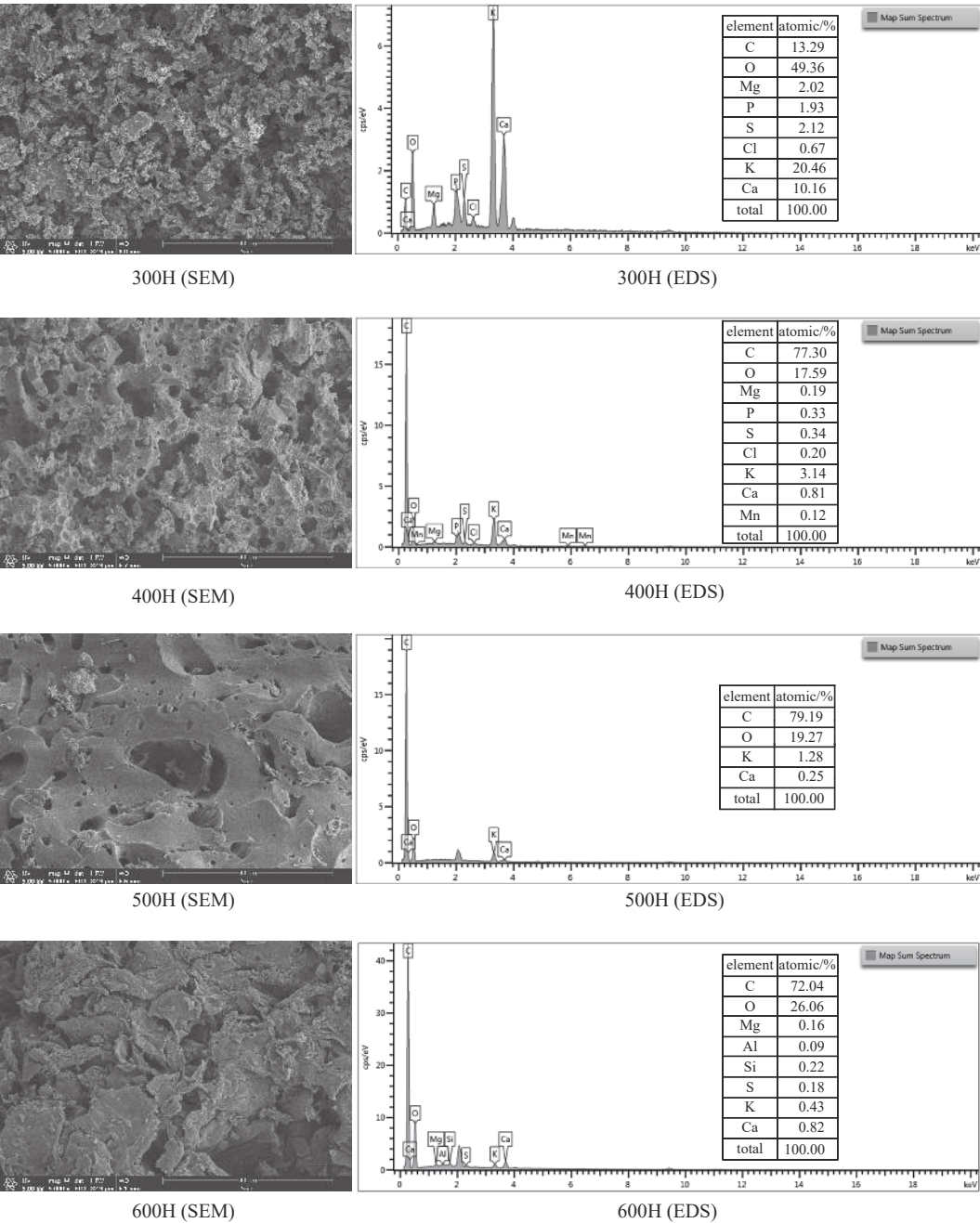
由图 2 可知: 在同时放大 5000 倍的水平下, 300H 组整体呈现出结构较为密集的形状; 相对 400H 组而言, 500H 组来说缺少孔径结构。400H 组可看到大量细小的孔径结构, 类似蜂窝状, 孔径大小大约 $5\ \mu m$, 可看出在此温度条件下

核桃壳表面已产生明显变化; 500H 组表面开始变得较为光滑, 没有明显的纹理结构, 可以看到很多更大的孔径 ($15\sim 20\ \mu m$), 说明此温度下制作的生物炭具有较大的比表面积; 600H 组可以看到生物炭的孔径结构已被破坏, 可能是由于温度过高使得结构坍塌, 留下很多不规则的片状结构, 再放大可看到附着了一些细小的颗粒。

由图 2 可见: 300H 组富含大量微量元素 (Mg、P、S、Cl、K 和 Ca), 其中 K 含量高达 20.46%, 而 C 含量较低, 说明此时核桃壳还没有完全炭化, 其中含有的大量微量元素可能为未烧制核桃壳本身带有; 400H 组和 300H 组的微量元素组成相同, 但 C 含量迅速上升; 500H 组 C 含量达 79.19%, 说明此温度下烧制的生物炭已达到很高的 C 水平, 并已无大量微量元素, 仅含有 K 和 Ca; 600H 组则又产生大量微量元素, 并新出现了 Al 元素。从 300H 组到 600H 组的变化过程中 C 含量先升高后下降, 说明该过程是从核桃壳初始状态到炭化状态又到部分灰分化的过程, 600H 组含有的大量微量元素可对发酵产生正面影响。

2.2 不同生物炭对厌氧干发酵日产甲烷量和累计产气量的影响

由表 2 可知: 通过 50 d 的发酵试验, 空白组不产气, 可排除接种物和生物炭会对产气的影响。除 300H 组和 400H 组外, 各组平均甲烷含量皆达到 50% 以上, 属于正常发酵。由图 3 可知: 发酵初期各组产气无显著差异; 第 10 天以后, 500H 组、600H 组和 CK 组的日产甲烷量大



注：300H、400H、500H 和 600H 为 300、400、500 和 600 ℃ 处理组，下同。
Note: 300H, 400H, 500H and 600H were the treatment groups of 300, 400, 500 and 600 ℃; the same as below.

图 2 各组生物炭表面微观形态及能谱分析

Fig. 2 Microstructure and energy spectrum analysis of biochar in each group

幅度增加；第 16 天时，500H 组和 600H 组的日
产甲烷量达到了 CK 组的 1.43 倍和 1.24 倍，说明
添加生物炭对厌氧干发酵甲烷产量有明显的提升
效果。300H 组和 400H 组的日产甲烷量相对较
低，抑制产甲烷；第 20~30 天，600H 组日产甲
烷量显著优于其他组，平均为 CK 组的 1.81 倍，
为产气的高峰时段。在工程运行过程中此阶段达

到总产气量的 80%，可将固体滞留时间定为 30 d。
在 35 d 以后，各组产气均缓慢降低，直至 50 d
结束产气。由此可知：600 ℃ 下烧制成的生物炭
作为添加剂明显可以缩短干发酵的发酵周期，提
前将发酵原料中有机物质很好的降解，最终达到
较好的产气效果。

由表 2 和图 3 可知：600H 组累计产甲烷量

最多, 达 (4011.29 ± 65.08) mL。300H 组和 400H 组在 20 d 前产气速率高, 之后减缓, 总体来说产气量不高, 明显低于其他组别, 表现出对厌氧干发酵体系产生抑制的现象。从各组的日 VS 产甲烷量来看, 在前 20 d 内 500H 组较 CK 组略微领

先, 在 30 d 时基本持平, 后期 CK 组略高。600H 组则从第 15 天开始产气量迅速增加, 并在 20~30 d 达到最高, 最终累计 VS 产甲烷量为 CK 组的 1.27 倍。这说明 600 °C 下烧制成的生物炭是最有利于干发酵的外源添加剂。

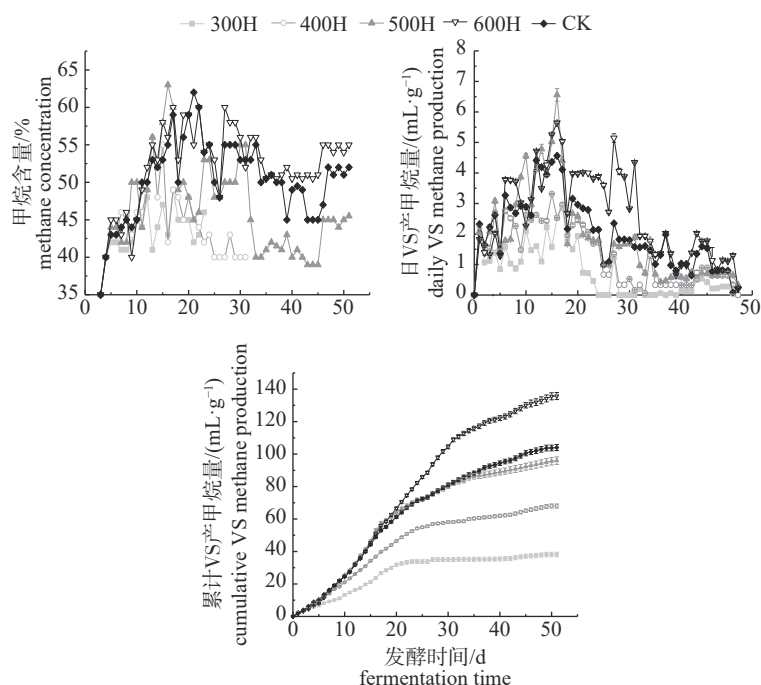
表 2 发酵产气情况

Tab. 2 Gas production by fermentation

处理 treatment	TS 产甲烷量/(mL·g ⁻¹) TS methane production	VS 产甲烷量/(mL·g ⁻¹) VS methane production	平均甲烷含量/% average methane content	总产甲烷量/mL total methane production	达总产甲烷 80% 的时间 time of dup to 80% of the total methane production
300H	38.14±1.35	51.54±1.82	45.0	1 136.20±40.62	第19天 the 19 th day
400H	68.02±1.24	91.93±1.68	48.0	1 889.35±37.28	第25天 the 25 th day
500H	95.95±2.32	129.67±3.13	50.0	2 822.80±69.69	第28天 the 28 th day
600H	135.76±2.16	183.46±2.93	54.0	4 011.29±65.08	第30天 the 30 th day
CK	104.02±1.82	140.56±2.46	51.0	3 164.85±54.68	第31天 the 31 st day
空白组 blank group	0	0	0	0	0

注: 300H、400H、500H 和 600H 为 300、400、500 和 600 °C 处理组; CK. 奶牛粪+接种物; 空白组. 接种物+生物炭。

Note: 300H, 400H, 500H and 600H were the treatment groups of 300, 400, 500 and 600 °C; CK. cow manure+inoculum; blank. inoculum+biochar.



注: 空白组不产气。

Note: There was no methane in the blank group.

图 3 甲烷含量、日 VS 产甲烷量和累计 VS 产甲烷量变化情况

Fig. 3 Change of methane content, daily VS methane production and cumulative VS methane production

2.3 不同生物炭对反应体系微生物菌群的影响

由图 4 可知: CK 组和 500H 组可见数量多、表面光滑匀称的微生物菌群, 600H 组出现体积较大、直径约为 2.5 μm 的微生物菌群, 均部分形成团聚体。

3 讨论

生物炭电镜扫描结果发现: 300H 组的核桃壳生物炭未呈现明显的孔径结构, 可能是由于 300 °C 还未达到核桃壳的热解温度 (350 °C 以

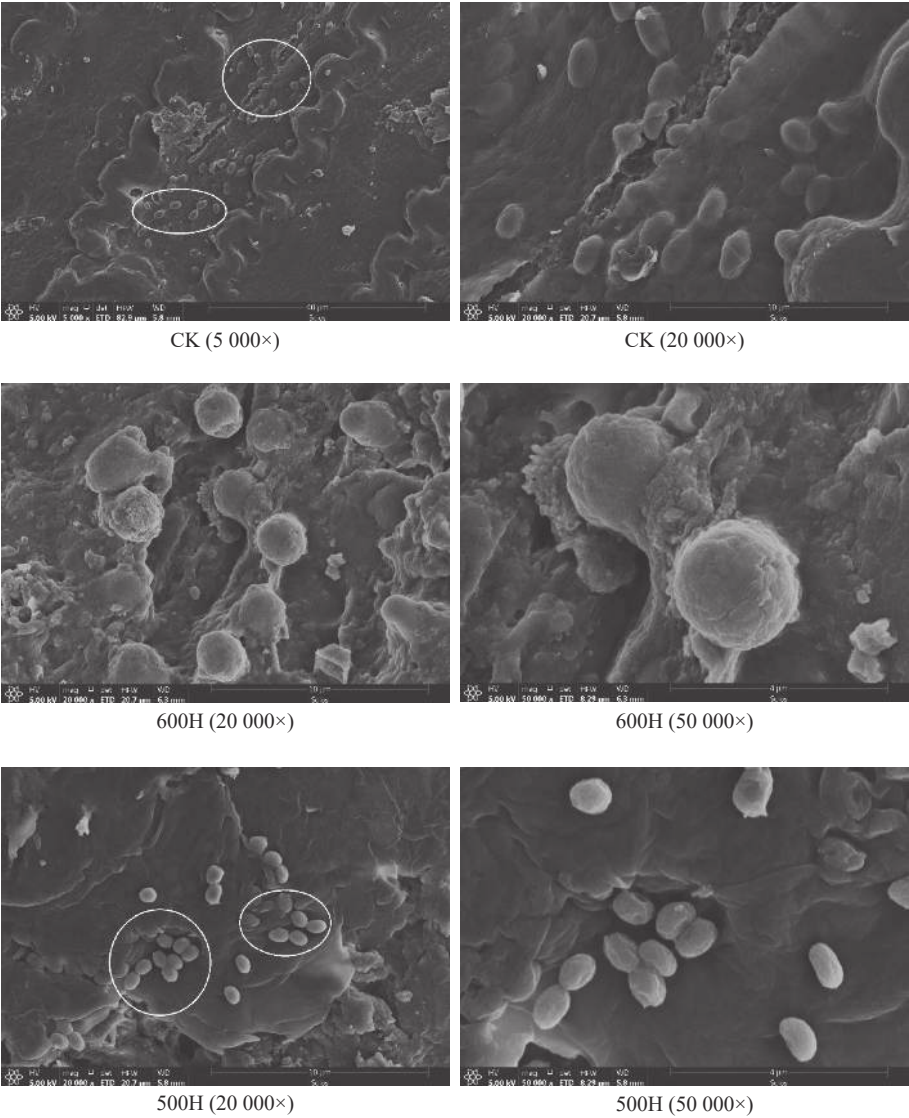


图 4 厌氧微生物微观形态结构
Fig. 4 Microstructure of anaerobic microorganism

上)^[12]，故表面未产生太大变化；500H 组的大孔径结构与前人研究^[12]相符，这些大孔径可能有利于最终在厌氧发酵过程中的电子传递 (DIET)，利于产甲烷菌生长发育，在后续发酵试验中也发现 500H 组确实是在发酵前中期很好地起到了促进产甲烷效果。厌氧发酵试验中产甲烷效果最好的是 600H 组，分析其原因可能是 600H 组在烧制后表面存在少量灰烬，对发酵起到了促进作用。有研究表明：灰分中含有一定量微量元素，微量元素有利于促进产甲烷菌的生长和激活酶活性^[13]。另外，600H 组产甲烷效果最好的结果与许彩云等^[14]的研究结果相似，即 600℃ 下热解的生物炭对厌氧发酵作用好于相对低温下热解的

生物炭。500H 组、600H 组和 CK 组电镜扫描结果发现微生物菌群呈现聚集情况与曾涛涛等^[15]电镜扫描下的结果类似。产甲烷效果比较突出的 600H 组微生物菌群数量很多，推测该组发酵中累计产甲烷量和产甲烷率优于其他组的原因是大量球菌的富集；也可能是多种微生物聚集成团，形成互赢共生的协同作用，而其他组的协同作用相对较差。研究显示：不同菌群对厌氧发酵的影响效果不同^[16-17]，但电镜扫描不能鉴定菌种，需要高通量测序进行微生物菌群分析，以探讨不同生物炭为何造成不同菌群的生长，下一步可具体针对生物炭对厌氧干发酵中微生物的影响方面进行深入探究。

生物炭具有廉价易得、具有吸附特性等优势, 常被用于厌氧发酵过程中^[17-18]。但现有研究多以厌氧湿发酵为对象, 本研究则是将不同温度下烧制的生物炭添加至厌氧干发酵体系, 探究其影响, 结果表明: 生物炭可以明显提高甲烷含量、提升甲烷产量和缩短反应周期。本研究中生物炭对厌氧干发酵的促进程度与 YIN 等^[19]和 LINVILLE 等^[20]的结果相近, 提升了约 30% 的产甲烷量。电镜扫描分析可知: 生物炭作为一种吸附类添加剂在反应过程中富集了厌氧微生物, 对厌氧干发酵进程起到积极的作用, 与 SEBASTIAN 等^[21]的研究结果相近。从以上两点可证明生物炭对促进厌氧干发酵产甲烷也具有良好的效果。

[参考文献]

- [1] 魏佳容. 减量化与资源化: 农业废弃物法律调整路径研究 [J]. 华中农业大学学报 (社会科学版), 2019(1): 116. DOI: [10.13300/j.cnki.hnwkxb.2019.01.013](https://doi.org/10.13300/j.cnki.hnwkxb.2019.01.013).
- [2] 陶秀萍, 董红敏. 畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 37. DOI: [10.13304/j.nykjdb.2016.764](https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2016.764).
- [3] KOTHARI R, PANDEY A K, KUMAR S, et al. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 174. DOI: [10.1016/j.rser.2014.07.011](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011).
- [4] 白顺星, 赵红梅, 杨姝, 等. 生物处理对杂交狼尾草干式厌氧发酵产沼气的的影响 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2018, 33(1): 154. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201610030](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201610030).
- [5] QIU L, DENG Y F, WANG F, et al. A review on biochar-mediated anaerobic digestion with enhanced methane recovery[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109373. DOI: [10.1016/j.rser.2019.109373](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109373).
- [6] CHEN S S, ROTARU A, SHRESTHA P M, et al. Promoting interspecies electron transfer with biochar[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5019. DOI: [10.1038/srep05019](https://doi.org/10.1038/srep05019).
- [7] ROTARU A, SHRESTHA P M, LIU F H, et al. A new model for electron flow during anaerobic digestion: direct interspecies electron transfer to *Methanosaeta* for the reduction of carbon dioxide to methane[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(1): 408. DOI: [10.1039/C3EE42189A](https://doi.org/10.1039/C3EE42189A).
- [8] MORITA M, MALVANKAR N S, FRANKS A E, et al. Potential for direct interspecies electron transfer in methanogenic wastewater digester aggregates[J]. mBio, 2011, 2(4): e00159. DOI: [10.1128/mBio.00159-11](https://doi.org/10.1128/mBio.00159-11).
- [9] MUMME J, SROCKE F, HEEG K, et al. Use of biochars in anaerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2014, 164: 190. DOI: [10.1016/j.biortech.2014.05.008](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.008).
- [10] 郑盼, 尹芳, 张无敌, 等. 添加活性炭的猪粪厌氧干发酵研究 [J]. 中国沼气, 2018, 36(1): 55. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1166.2018.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1166.2018.01.009).
- [11] 黄华, 王雅雄, 唐景春, 等. 不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能 [J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1885. DOI: [10.13227/j.hjcx.2014.05.036](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.2014.05.036).
- [12] 徐绍平, 亓爱笃. 核桃壳炭化行为研究 [J]. 林产化学与工业, 1996, 16(3): 51.
- [13] 张万钦, 吴树彪, 郎乾乾, 等. 微量元素对沼气厌氧发酵的影响 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 1. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6819.2013.10.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2013.10.001).
- [14] 许彩云, 靳红梅, 常志州, 等. 麦秸生物炭添加对猪粪中温厌氧发酵产气特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1172. DOI: [10.11654/jaes.2016.06.020](https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.020).
- [15] 曾涛涛, 廖伟, 谢水波, 等. 柠檬酸废水厌氧颗粒污泥微生物菌群结构解析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(8): 117. DOI: [10.11918/j.issn.0367-6234.2016.08.019](https://doi.org/10.11918/j.issn.0367-6234.2016.08.019).
- [16] 潘君廷, 马俊怡, 邱凌, 等. 生物炭介导鸡粪厌氧消化性能研究 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2721. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6923.2016.09.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2016.09.028).
- [17] 冯晶, 荆勇, 赵立欣, 等. 生物炭强化有机废弃物厌氧发酵技术研究 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 264. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2019.12.031](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2019.12.031).
- [18] LU J S, CHANG J S, LEE D J. Adding carbon-based materials on anaerobic digestion performance: a mini-review[J]. Bioresource Technology, 2020, 300: 122696. DOI: [10.1016/j.biortech.2019.122696](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122696).
- [19] YIN C K, SHEN Y W, YUAN R X, et al. Sludge-based biochar-assisted thermophilic anaerobic digestion of waste-activated sludge in microbial electrolysis cell for methane production[J]. Bioresource Technology, 2019, 284: 315. DOI: [10.1016/j.biortech.2019.03.146](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.146).
- [20] LINVILLE J L, SHEN Y W, LEON P A, et al. In-situ biogas upgrading during anaerobic digestion of food waste amended with walnut shell biochar at bench scale[J]. Waste Management & Research, 2017, 35(6): 669. DOI: [10.1177/0734242X17704716](https://doi.org/10.1177/0734242X17704716).
- [21] SEBASTIAN S, FLORIAN B, EVA T, et al. Biological syngas methanation via immobilized methanogenic archaea on biochar[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 823. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.396](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.396).

责任编辑: 何馨成