

# 堆肥预处理温度控制促进麦秸厌氧发酵产沼气

陈广银, 马慧娟, 常志州<sup>\*</sup>, 叶小梅, 杜 静, 徐越定, 张建英

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所 农业部农村可再生能源开发利用华东科学观测实验站, 南京 210014)

**摘 要:** 为阐释温度在堆肥预处理影响秸秆厌氧发酵产沼气中的作用, 以麦秸为原料, 研究堆肥不同升温阶段麦秸的厌氧发酵产气特性, 并以麦秸堆肥的温度数据为基础, 以灭菌后的麦秸为原料进行模拟堆肥(不同温度处理), 模拟堆肥后的麦秸进行厌氧发酵产沼气。结果表明, 在堆温升至 55℃前, 麦秸干物质(TS)损失率为 4.06%, 当堆温升至 55℃后麦秸 TS 损失率迅速增加, 堆肥 10 d 后麦秸 TS 损失率达 22.45%; 堆肥后麦秸厌氧发酵产气速率并无明显提高, TS 产气量随堆肥时间先增加后降低, 以堆温升至 55℃时麦秸 TS 产气量最大, 为 349.92 mL/g, 较开始堆肥增加了 7.56%, 扣除堆肥造成麦秸有机物损失, 堆肥预处理对麦秸产气量并无明显促进; 当堆温超过 55℃以上 9 d 的麦秸产气量仅为开始堆肥的 66.58%。模拟堆肥的结果表明, 不同温度处理对麦秸有机物损失、物质组成均有较大影响, 模拟堆肥后麦秸半纤维素大幅降低了 28.10%, TS 产气量随处理温度、处理时间的增加先增加后降低, 当处理温度为 55℃时获得最大 TS 产气量, 为 342.36 mL/g, 较未处理提高了 8.35%; 随着处理温度的提高和处理时间的延长, 麦秸 TS 产气量逐渐降低。以上结果表明, 堆肥预处理产生的高温对破坏秸秆物质结构、提高其厌氧生物转化性能有较大影响, 当秸秆堆体温度升至 55℃时应停止堆肥, 进行厌氧发酵产沼气。该文可为堆肥预处理在秸秆沼气工程中应用提供参考。

**关键词:** 厌氧消化, 沼气, 温度, 麦秸, 堆肥预处理

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.025

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0179-07

陈广银, 马慧娟, 常志州, 等. 堆肥预处理温度控制促进麦秸厌氧发酵产沼气[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 179—185.

Chen Guangyin, Ma Huijuan, Chang Zhizhou, et al. Promotion of biogas production of wheat straw by controlling composting pretreatment temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 179—185. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

生物预处理是秸秆预处理的重要方法之一, 因其处理成本低、无二次污染等优点, 受到研究者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。堆肥预处理是生物预处理的重要方面, 因其预处理成本低、操作简单方便、可实现低温条件下秸秆厌氧发酵快速启动等优点被广泛用于秸秆沼气工程<sup>[6-10]</sup>。但是, 堆肥预处理提高秸秆厌氧消化产气的效果还存在争议。方文杰等<sup>[11]</sup>比较了不同预处理后稻秸的产气效果, 指出堆沤作为稻秸预处理技术, 不仅操作简便且可大幅提高其厌氧消化产气量, 较对照提高了 3%~49.5%。李冰冰等<sup>[12]</sup>

研究了堆肥 0、2、4、6、8、10、12 和 15 d 后秸秆的厌氧发酵产气特性, 结果表明, 堆肥预处理可以提高产气中甲烷含量, 最高达 70%。然而, 高白茹等<sup>[13-14]</sup>研究发现, 高温堆肥 6 d 后的稻秸干物质产气量较对照略有降低, 产气中甲烷含量无明显变化, 考虑到堆肥造成的秸秆有机物损失, 堆肥后秸秆的干物质产气量仅为未堆肥秸秆的 90.07%。陈广银等<sup>[15]</sup>研究了堆肥 0、3、6 和 9 d 后麦秸的厌氧消化产气特性, 结果表明, 堆肥预处理对麦秸纤维素结晶区有一定的破坏作用, 堆肥后麦秸的产气速率提高, 堆肥 3 d 麦秸累积产气量达到总产气量 80%的时间较对照减少了 8 d, 但考虑到堆肥造成的秸秆有机物损失, 堆肥 3、6 和 9 d 的麦秸干物质产气量仅为对照的 100.30%、83.19%和 77.59%, 各处理产气中甲烷含量无明显差异。从已有的报道来看, 堆肥预处理影响秸秆厌氧发酵产气的效果并不稳定, 其根源在于堆肥程度控制不合理。由于堆肥过程是一个生物过程, 该过程受环境温度、发酵物料种类和特性、堆体大小、含水率、C/N 等<sup>[16-19]</sup>影响较大, 因此, 简单的用堆肥时间评价堆肥预处理程度并不合适, 但目前有关秸秆堆肥预处理的研究大

收稿日期: 2013-06-22 修订日期: 2013-10-10

基金项目: 江苏省农业自主创新项目(CX(12)1002); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-004)

作者简介: 陈广银(1981—), 男, 江苏句容人, 博士, 主要从事生物质的研究, 中国农业工程学会会员, 会员号: E041100020M。南京市玄武区钟灵街 50 号 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014。Email: chengy522@gmail.com.

<sup>\*</sup> 通信作者: 常志州(1957—), 男, 江苏句容人, 研究员, 主要从事农业固体废弃物资源化研究。南京市玄武区钟灵街 50 号 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014。Email: czhizhou@hotmail.com



H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 凯氏定氮法<sup>[22]</sup>; 挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs) 采用气相色谱仪 (GC-2014, SHIMADZU 公司, 日本) 进行测定, 使用 Stabil-Wax-DA30 m×0.53 mm×0.25 m 型毛细管柱, FID 检测器, 程序升温, 以 4-甲基戊酸为内标物; 采用范氏法 (Van Soest) 测定麦秸纤维素、半纤维素和木质素 (FIWE-6, Velp Scientifica 公司, 意大利)<sup>[23]</sup>。

#### 1.4 作图及统计分析

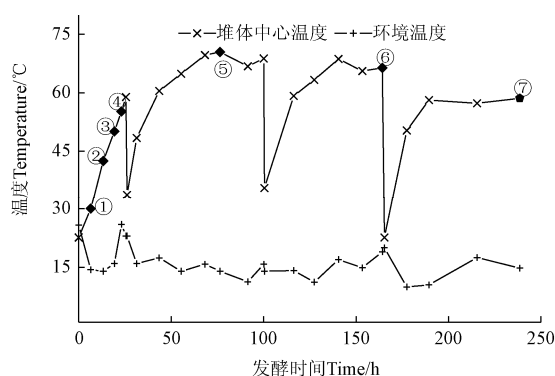
采用 Origin 8.0 作图, Excel2003 软件处理试验数据, SPSS 13.0 软件进行统计分析, 置信水平为 95% ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆肥预处理对麦秸厌氧发酵产沼气的影响

#### 2.1.1 堆肥预处理对麦秸物质损失的影响

堆肥过程中堆温的变化见图 1。可以看出, 试验启动后, 堆温迅速升高, 19 h 后堆温即达到 50℃, 25.56 h 后堆温达到 58.9℃, 此时进行第 1 次翻堆, 翻堆后堆温降至 33.7℃, 之后迅速回升, 68 h 后堆温达到 69.7℃, 之后稳定在 65~70℃ 之间, 分别在试验第 100 h 和 165 h 进行第 2 次和第 3 次翻堆, 翻堆后堆温变化趋势同第一次翻堆, 但温度上升幅度逐渐降低。根据试验方案, 分别在试验开始 (T0)、堆温达到 30℃ (T1)、40℃ (T2)、50℃ (T3)、55℃ (T4)、55℃ 以上 2 d (T5)、55℃ 以上 5 d (T6)、55℃ 以上 9 d (T7) 取样, 对应本次堆肥试验为试验第 0、6.47、13.33、19.33、23.06、76.41、164.26 和 238.56 h 取样测定秸秆干物质损失, 其余用于厌氧发酵产沼气试验。



注: 图中①~⑦分别代表堆温达到 30、40、50、55℃ 以上 2 d、55℃ 以上 5 d 和 55℃ 以上 9 d 的时间点。

Note: ①~⑦ represents sampling time with composting pile temperature up to 30, 40, 50℃ for more than 2 d, 55℃ for more than 5 d and 55℃ for more than 9 d.

图 1 试验过程中堆温的变化

Fig.1 Changes of temperature during composting process

堆肥过程中秸秆 TS 损失率的结果见图 2。堆肥过程伴随着微生物分解利用秸秆有机物和秸秆堆体升温 2 个过程, 由于秸秆有机物的大量分解, 造

成堆肥过程中秸秆干物质的大量损失。堆肥启动后 25 h 内秸秆 TS 损失率增加缓慢, 仅从第 6.47 h 时的 2.96% 增加到第 23.06 h 的 4.06%。之后, 随着堆温的不断升高, 秸秆 TS 损失率迅速增加, 增加幅度在试验第 23.06~164.26 h 间达到最大, 之后有所降低, 这与堆温的变化一致。堆体较高的堆温伴随着秸秆有机物的大量分解, 导致秸秆干物质大量损失。经 238.56 h 堆肥处理后, 秸秆 TS 损失率达 22.45%。

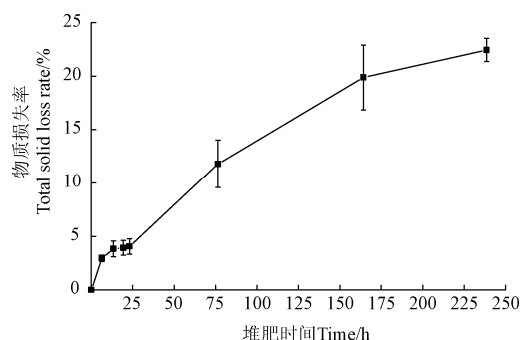


图 2 堆肥过程中麦秸干物质损失率的变化

Fig.2 Changes of total solid loss rate of wheat straw during composting process

#### 2.1.2 堆肥后麦秸厌氧发酵产气特性的变化

累积产气量占总产气量的百分比可以反映厌氧发酵过程中发酵原料产气速率。各处理麦秸产气速率变化趋势相似, 均为发酵前期迅速增加, 25 d 后增加速度明显降低, 且各处理间无明显差异 ( $P > 0.05$ ), 表明堆肥预处理对麦秸产气速率并无明显促进作用, 这与高白茹等<sup>[13-14]</sup>研究结果一致, 与陈广银等<sup>[15]</sup>研究结果不同。分析可能的原因包括: 1)、堆肥预处理是微生物作用与物化作用联合作用的过程, 该过程的重复性不稳定; 2)、试验用原料不同, 原料特性 (包括通气性、理化特性、C/N 等) 的差异造成堆肥效果有较大差别; 3)、目前的研究报道均以堆肥时间 (即堆肥天数) 来衡量堆肥程度, 堆肥原料、环境温度、物料含水率、C/N、堆体大小等均影响堆体升温速率、维持高温时间, 造成不同研究者的研究结果间无法比较。

经 45 d 的批式厌氧发酵后, 各处理秸秆累积产气量的结果见图 3。可以看出, 在堆温达到 55℃ 前, 堆肥预处理对麦秸 TS 产气量无明显影响, 当堆温升至 55℃ 后, 堆肥后麦秸的 TS 产气量最大, 为 349.92 mL/g, 之后随着堆肥时间的延长, 麦秸 TS 产气量逐渐降低。经 238.56 h 的堆肥处理后, 麦秸 TS 产气量为 279.31 mL/g, 仅为堆肥开始麦秸的 85.85%。可见, 堆肥时间太长不利于麦秸产气, 堆肥预处理对提高麦秸厌氧发酵产气效果并不明显, 以堆温达到 55℃ 时麦秸的产气效果最好, 但较堆肥开始也仅增加了 7.56%。

由于堆肥过程造成了麦秸干物质的损失, 扣除堆肥造成的麦秸干物质损失后, 堆肥后麦秸 TS 产气量见图 3。可以看出, 麦秸 TS 产气量在堆温达到 55℃前无明显变化, 当堆温升至 55℃后麦秸 TS 产气量迅速降低。经 238.56 h (近 10 d) 的堆肥处理后, 麦秸 TS 产气量为 216.60 mL/g 较堆肥开始麦秸降低了 33.42%。尽管现有的有关秸秆堆肥预处理后发酵产沼气的研究大多认为堆肥预处理可以破坏秸秆物质结构, 提高其厌氧生物转化率<sup>[7,9]</sup>, 但大多是以堆肥后的秸秆干物质为基础计算秸秆干物质产气量, 而未考虑堆肥过程造成秸秆干物质损失。尽管堆肥过程可以部分破坏秸秆的物质结构, 将部分被难降解有机物包裹的易分解有机物释放出来, 但堆肥过程造成的大量易分解有机物损失, 削弱了这种促进作用, 且堆肥预处理时间太长还导致秸秆干物质产气潜力大幅下降。从本研究的结果来看, 以堆肥时间评估堆肥程度并不合适, 以堆温升至 55℃停止堆肥进行厌氧发酵产沼气更合适。

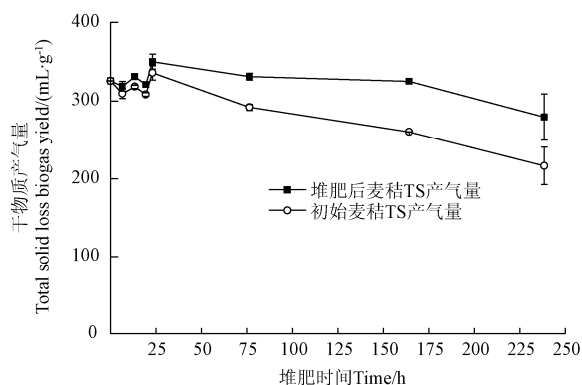
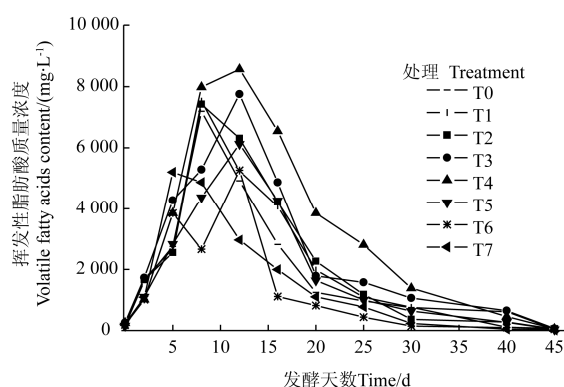


图3 麦秸累积产气量随堆肥预处理时间的变化

Fig.3 Changes of biogas yield of pretreated wheat straw with the composting pretreatment time



注: T0~T7 分别代表以堆肥开始、堆体温度达到 30、40、50、55、55℃以上 2 d、55℃以上 5 d 和 55℃以上 9 d 的秸秆为原料进行厌氧发酵产沼气。  
Note, T0-T7 represents the treatments which digested these straw with uncomposted, composting pile temperature up to 30, 40, 50, 55, 55℃ for more than 2 days, 55℃ for more than 5 days and 55℃ for more than 9 d for biogas production.

图4 厌氧发酵过程中挥发性脂肪酸的变化

Fig.4 Changes of volatile fatty acids content during anaerobic digestion

各处理麦秸厌氧发酵过程中发酵液 VFAs 含量的变化见图 4。可以看出, 各处理发酵过程中 VFAs 含量变化趋势相似, 均为发酵前 10~15 d 迅速增加, 之后迅速降低, 20 d 后降低速率趋缓。从 VFAs 含量看, VFAs 质量浓度最大值为 8 564.78 mg/L, 出现在 T4 发酵第 12 d; 各处理 VFAs 峰值最低值为 4 868.50 mg/L, 出现在 T7 发酵第 8 天, VFAs 的结果与各处理产气的结果一致, 再次说明适度堆肥可以破坏秸秆的物质结构, 促进其厌氧生物转化, 过度堆肥导致其厌氧发酵时水解产酸速率和程度均下降, 产气量下降。

## 2.2 不同温度处理对麦秸厌氧发酵产沼气的影

本部分包括 3 个试验, 即  $\gamma$  射线辐照处理、模拟堆肥和厌氧发酵试验。

### 2.2.1 $\gamma$ 射线辐照对麦秸的灭菌效果

为减少麦秸自带微生物对温度预处理的影响, 采用  $\gamma$  射线辐照对麦秸进行灭菌处理, 辐照前后麦秸中细菌、放线菌和真菌计数结果见表 1。可以看出, 麦秸自身带有大量微生物, 细菌、放线菌和真菌数量均在  $10^5$  以上。经  $\gamma$  射线辐照后, 麦秸中细菌、放线菌和真菌数量均大幅降低, 分别从辐照前的  $5.3 \times 10^6$ 、 $4.1 \times 10^5$  和  $4.5 \times 10^5$  降低为辐照后的  $1.6 \times 10^4$ 、 $3.2 \times 10^3$  和  $1.2 \times 10^3$ , 分别降低了 99.70%、99.22%和 99.73%, 表明辐照对杀灭麦秸中微生物有较好的效果, 但由于试验未对辐照剂量和辐照时间进行优化, 故未能实现 100%灭菌。此外, 由于经辐照后的麦秸直接存放于 4℃冰箱中, 存放时间达半个月, 这可能导致麦秸中三大菌数量增加。辐照处理大幅减少了麦秸自身携带的微生物数量, 削弱了这些微生物对麦秸模拟堆肥的影响。

表1 辐照前后麦秸中细菌、放线菌及真菌计数结果

Table 1 Count results of bacteria, actinomycetes and fungi of straw obtained before and after  $\gamma$ -ray radiation

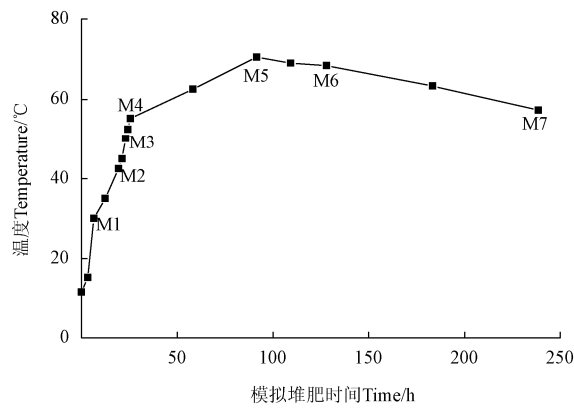
处理 Treatment	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungi
未辐照麦秸 Unpretreated wheat straw	$5.3 \times 10^6$	$4.1 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$
辐照麦秸 $\gamma$ -ray pretreated wheat straw	$1.6 \times 10^4$	$3.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$

### 2.2.2 不同温度预处理对麦秸理化特性的影响

将辐照后的麦秸调节 C/N 至 30, 用无菌水调节含水率至 65%后, 在实验室内根据秸秆堆肥试验堆温的数据模拟堆肥, 在每个时间点之间设置一个平均时间, 相对应每个温度点之间设置一个平均温度。模拟堆肥过程中温度的变化见图 5。

模拟堆肥过程中麦秸理化特性的结果见表 2。

可以看出, 麦秸中有机碳和 VS 均随着试验的进行缓慢降低, 主要发生在试验 23 h 后, 这与堆肥预处理的结果一致, 分别从试验初始的 52.05%和 91.53%



注：M1~M7 分别代表处理温度为 30、40、50、55、55℃ 以上 2 d、55℃ 以上 5 d 和 55℃ 以上 9 d 的秸秆为原料进行厌氧发酵产沼气。

Note: M1-M7 represents the treatments which digested these straw with treated temperature was 30, 40, 50, 55, 55℃ for more than 2 d, 55℃ for more than 5 days and 55℃ for more than 9 days for biogas production.

图 5 试验过程中温度的变化

Fig.5 Changes of the temperature during simulated composting process

降低为试验结束时的 49.15%和 90.99%，表明模拟堆肥同样造成了秸秆有机物的损失。试验过程中纤维素含量在波动较大，半纤维素含量稳定下降，从试验初期的 30.60%降低到试验结束时的

22.00%，降低了 28.10%；木质素含量逐渐降低，但降低幅度不大。以上结果表明，不同温度处理破坏麦秸物质组成，造成麦秸有机物损失，说明堆肥预处理过程中，堆肥形成的高温是破坏秸秆物质组成和结构的重要因素，对秸秆有机物损失也有一定贡献。

### 2.2.3 麦秸厌氧发酵产气特性

模拟堆肥不同时期的麦秸厌氧发酵产气结果见表 3。可以看出，不同温度处理对麦秸 TS 产气量有较大影响，麦秸 TS 产气量随处理温度和处理时间的延长先增加后降低，在温度达到 55℃（M4）时获得最大 TS 产气量，为 342.36 mL/g，较试验初始提高了 8.35%，与堆肥预处理的效果相当，表明温度对麦秸物质结构的破坏在秸秆堆肥预处理过程中的重要性；当温度继续增加，处理时间继续延长，麦秸的 TS 产气量反而降低，试验结束时麦秸（M7）TS 产气量为 269.51 mL/g，较试验初始降低了 14.83%，也就是说温度太高、处理时间太长均不利于后续麦秸厌氧发酵产沼气，这与堆肥预处理的试验结果一致。各处理甲烷含量无明显差异（ $P>0.05$ ）。

表 2 模拟堆肥过程中麦秸理化特性的变化

Table 2 Changes of physico-chemical properties of wheat straw during simulated composting experiment

处理 Treatment	有机碳 Total organic carbon	挥发性固体 VS	纤维素 Cellulose	半纤维素 Hemicellulose	木质素 Lignin
M0	52.05±1.42a	91.53±1.04a	37.11±2.98a	30.60±0.14a	14.14±4.34a
M1	51.87±2.50a	91.51±0.03a	41.94±1.19a	29.11±1.05ab	12.00±1.47a
M2	51.19±0.04a	91.39±0.43a	39.78±0.69a	29.78±0.92a	12.71±1.86a
M3	51.29±2.37a	90.32±0.39ab	38.34±0.55a	28.88±0.20ab	13.71±2.57a
M4	51.82±0.02a	91.87±0.03a	41.74±0.14a	28.71±0.57ab	11.17±1.12a
M5	49.85±0.20a	91.03±0.09ab	40.99±1.05a	27.60±0.52ab	10.67±1.36a
M6	49.15±0.28a	90.99±0.60ab	42.05±2.01a	26.51±1.80b	12.67±0.43a
M7	48.76±0.36a	89.55±0.27b	37.69±0.38a	22.00±0.03c	12.99±5.04a

注：同列同字母表示无显著差异（ $P>0.05$ ），否则有差异显著（ $P<0.05$ ）。M0~M7 分别代表未处理、处理温度为 30℃、40℃、50℃、55℃、55℃ 以上 2 d、55℃ 以上 5 d 和 55℃ 以上 9 d 的秸秆为原料进行厌氧发酵产沼气，下同

Note: The same column data marked same letters within same factors, indicate no significant difference ( $p>0.05$ ), or have significant difference ( $P<0.05$ ). M0-M7 represents the treatments which digested these straw with untreated, treated temperature up to 30℃, 40℃, 50℃, 55℃, 55℃ for more than 2 days, 55℃ for more than 5 days and 55℃ for more than 9 days for biogas production. The same below.

表 3 模拟堆肥后麦秸的产气数据

Table 3 Gas data of pretreated wheat straw

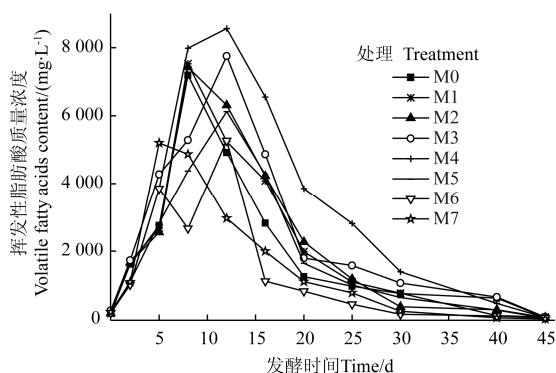
处理	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
TS 产气量 TS biogas yield/(mL·g <sup>-1</sup> )	315.97±15.75a	321.94±1.37a	327.29±0.49a	339.17±7.46a	342.36±6.87a	322.57±17.38a	308.06±9.23a	269.51±9.13b
平均甲烷含量 Average methane content/%	46.98±0.22b	48.19±0.18a	46.47±0.36b	46.82±0.43b	46.45±0.19b	46.67±0.55b	46.41±0.39b	46.93±0.27b
TS 产甲烷量 TS methane yield/(mL·g <sup>-1</sup> )	148.43±6.79a	155.14±0.66a	152.08±0.23a	158.81±3.49a	159.04±3.19a	150.04±8.11a	142.96±4.28a	126.47±4.29b

### 2.2.4 VFAs 的变化

厌氧发酵过程中各处理水解液 VFAs 的变化见图 6。可以看出，各处理 VFAs 变化趋势相似，均

为先增加后降低。各处理 VFAs 含量在试验第 8~12 天达到最大，之后逐渐下降。VFAs 最大值为 8893.20 mg/L，出现在 M3 发酵第 12 天，其次为

8472.85 mg/L, 出现在 M4 发酵第 12 天。在各处理中, M4 水解液中 VFAs 浓度下降速度最慢, 维持较高浓度的时间最长, 表明该处理麦秸的水解产酸能力最强, 这与产气的结果一致。



注: M0~M7 分别代表未处理、处理温度为 30、40、50、55、55℃ 以上 2 d、55℃ 以上 5 d 和 55℃ 以上 9 d 的秸秆为原料进行厌氧发酵产沼气。  
Note: M0-M7 represents the treatments which digested these straw with untreated, treated temperature up to 30, 40, 50, 55, 55℃ for more than 2 days, 55℃ for more than 5 days and 55℃ for more than 9 days for biogas production.

图 6 厌氧发酵液中总 VFAs 的变化

Fig.6 Changes of VFAs content during anaerobic digestion

### 3 结 论

1) 堆肥预处理可以一定程度的破坏秸秆的物质结构, 提高其厌氧微生物可利用率, 但堆肥时间过长造成秸秆有机物大量损失, 当堆温达到 55℃ 时应停止堆肥, 接种进行厌氧发酵产沼气。

2) 堆肥预处理并不能提高麦秸厌氧发酵产气速率。堆肥后麦秸干物质产气量呈先增加后降低的趋势, 在堆温达到 55℃ 时麦秸干物质产气量最大, 较对照提高了 7.56%。如果将堆肥造成的麦秸有机物损失考虑在内, 堆肥预处理对麦秸产气量并无促进作用, 堆肥时间太长造成麦秸干物质产气量大幅降低。

3) 在麦秸堆肥预处理过程中, 堆肥产生的高温是破坏秸秆物质结构、提高其厌氧发酵可利用率的重要因素。

4) 对于以堆肥作为秸秆预处理方式的沼气工程, 简单的以堆肥时间作为评价堆肥程度的指标并不恰当, 以堆温作为评价堆肥程度的指标更合适, 这对减少堆肥造成原料有机物损失意义重大。

#### [参 考 文 献]

[1] Canam T, Town J R, Tsang A, et al. Biological pretreatment with a cellobiose dehydrogenase-deficient strain of *trametes versicolor* enhances the biofuel potential of canola straw [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(21): 10020—10027.  
[2] Yu Hongbo, Zhang Xiaoyu, Ke Jing, et al. Evaluation of white-rot fungi-assisted alkaline/oxidative pretreatment

of corn straw undergoing enzymatic hydrolysis by cellulase[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, 110(6): 660—664.

- [3] Yamagishi K, Kimura T, Watanabe T. Treatment of rice straw with selected *Cyathus stercoreus* strains to improve enzymatic saccharification[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(13): 6937—6943.  
[4] Taniguchi M, Suzuki H, Watanabe D, et al. Evaluation of pretreatment with *Pleurotus ostreatus* for enzymatic hydrolysis of rice straw[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2005, 100(6): 637—643.  
[5] Zhong Weizhang, Zhang Zhongzhi, Luo Yijing, et al. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(24): 11177—11182.  
[6] Zhong Weizhang, Zhang Zhongzhi, Luo Yijing, et al. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(24): 11177—11182.  
[7] 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.  
[8] 孙然, 冷云伟, 赵兰, 等. 秸秆原料预处理方法研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2010(6): 453—455.  
[9] 李淑兰, 梅自力, 张国治, 等. 秸秆厌氧消化预处理技术综述[J]. *中国沼气*, 2011, 29(5): 29—33.  
Li Shulan, Mei Zili, Zhang Guozhi, et al. Review of pretreatment technology for crop straw anaerobic digestion[J]. *China Biogas*, 2011, 29(5): 29—33. (in Chinese with English abstract)  
[10] 陈小华, 朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 279—283.  
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(3): 279—283. (in Chinese with English abstract)  
[11] 方文杰. 堆沤预处理提高稻草厌氧消化产气量的实验研究与机理探讨[D]. 北京: 北京化工大学, 2007.  
[12] 李冰冰, 肖波, 胡智泉, 等. 堆肥预处理对生物质厌氧消化特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(20): 10848—10851.  
Li Bingbing, Xiao Bo, Hu Zhiqian, et al. Effects of composting pretreatment on biological characteristics of anaerobic digestion[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(20): 10848—10851. (in Chinese with English abstract)  
[13] 高白茹, 常志州, 叶小梅, 等. 堆肥预处理对稻秸厌氧发酵产气量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 251—256.  
Gao Bairu, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei, et al. Effect of compost pre-treatment on biogas production from rice straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(5): 251—256. (in Chinese with English abstract)  
[14] 高白茹. 秸秆干式厌氧发酵技术研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2009.  
[15] 陈广银, 鲍习峰, 叶小梅, 等. 堆肥预处理对麦秸与奶牛废水混合物厌氧产沼气的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(1): 111—117.  
Chen Guangyin, Bao Xifeng, Ye Xiaomei, et al. Effect of Composting pretreatment on methane production of the mixture of wheat straw and cattle wastewater[J]. *China*

- Environmental Science, 2013, 33(1): 111–117. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李国学, 张福锁, 编著. 国体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 98–134.
- [17] 牛俊玲, 高军侠, 李彦明, 等. 堆肥过程中的微生物研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 185–189. Niu Junling, Gao Junxia, Li Yanming, et al. Evaluation of the role of microorganisms in composting[J]. Chinese Journal of Eco-Ag Riculture, 2007, 15(6): 185–189. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郁红艳, 曾光明, 胡天觉, 等. 真菌降解木质素研究进展及在好氧堆肥中的研究展望[J]. 中国生物工程杂志, 2013, 23(10): 57–61. Yu Hongyan, Zeng Guangming, Hu Tianju, et al. Advance in biodegradation of lignin by fungus and expectation of research in aerobic compost[J]. China Biotechnology, 2013, 23(10): 57–61. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252–256. Li Guoxue, Li Yuchun, Li Yanfu. Advance on Composting of Solid Waste and Utilization of Additives[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(2): 252–256. (in Chinese with English abstract)
- [20] Chen Guangyin, Zheng Zheng, Yang Shiguan, et al. Anaerobic batch digestion of *Spartina alterniflora* alone and co-digestion with cow feces[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(11): 1416–1421.
- [21] 中华人民共和国农业部. 农业行业标准 NY525-2002 有机肥料[S].
- [22] 鲍士旦主编. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39–69.
- [23] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1983.

## Promotion of biogas production of wheat straw by controlling composting pretreatment temperature

Chen Guangyin, Ma Huijuan, Chang Zhizhou<sup>\*</sup>, Ye Xiaomei, Du Jing, Xu Yueding, Zhang Jianying

(East China Scientific Observing and Experimental Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy,  
Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Environment,  
Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Composting pretreatment has been widely used in biogas plant of agricultural straw for improving biotransformation rate of lignocellulosic materials. However, the mechanisms on composting pretreatment of agricultural straw for biogas production need more research. In this study, two experiments were conducted to evaluate the impacts of composting pretreatment on biogas production of wheat straw. In the first experiment, the wheat straw was directly used for composting and then composted straw was used in the biomethane potential (BMP) test. For the second one, wheat straw was sterilized by gamma ray radiation pretreatment and treated under different temperature with different time. Then the treated straw was used for the BMP test. The results of experiments indicated that large percentage of organic matter in wheat straw was degraded during composting process. The total solid (TS) loss rate of wheat straw was only 4.06% when composting pile temperature was less than 55°C. When composting pile temperature was set up at 55°C, the TS loss rate of wheat straw increased 22.45% after 10 days' composting treatment. Gas data showed that biogas production rate of wheat straw was not improved obviously. The TS biogas yield of wheat straw increased with composting pile temperature and then decreased. The highest TS biogas yield of wheat straw of 349.92 mL/g was observed at 55°C of composting pile temperature, which is 7.56% higher than that of uncomposted wheat straw. There was no significantly improvement in biogas production between composted and uncomposted wheat straw during composting process for organic matter loss of wheat straw. However, longer composting time led to lower biogas yield of wheat straw. When composting pile temperature was kept at 55°C for 9 days, The TS biogas yield of composted wheat straw was only 66.58%. When the content of organic matter and material composition of wheat straw were changed, content of hemicellulose of wheat straw was decreased by 28.10%. Results of gas data of simulated composting experiment showed the same trend as the first experiment. The highest TS biogas yield of wheat straw of 342.36 mL/g was obtained at 55°C with 8.35%, which is higher than that of control. Therefore the high temperature from composting process is an important factor of destruction of lignocellulose structure and improving biotransformation rate of wheat straw. When the composting pile temperature was set up at 55°C, anaerobic digested inoculums was added into straw pile and can be used for biogas production.

**Key words:** anaerobic digestion, biogas, temperature, wheat straw, composting pretreatment

(责任编辑: 秦学敏)