

## 沼液喷淋秸秆与生物炭联合好氧发酵效果研究

丁京涛,马艳茹,沈玉君,程红胜,孟海波\*,宋立秋,张朋月

(1. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所,北京 100125;  
2. 农业部资源循环利用技术与模式重点实验室,北京 100125)

**摘 要:**为实现沼液的减量化和肥料化,以玉米秸秆为载体吸附过滤沼液,开展沼液喷淋与秸秆和生物炭联合好氧发酵试验,分析沼液喷淋对好氧发酵效果的影响,以及与秸秆和生物炭共发酵的效果。结果表明,粉碎后玉米秸秆吸附过滤猪粪沼液、鸡粪沼液后,秸秆含水率由5.92%分别上升至76.35%和85.72%,碳氮比由42.4分别上升至50.2和51.7,沼液中总悬浮物、总磷分别降低了34.42%~43.78%和20.00%~41.01%,而对溶解态的总磷、总钾吸附过滤效果一般。沼液喷淋翻抛可延长堆体发酵高温期2倍时长以上,有机质含量降低了10.42%~18.63%,氮磷钾含量提高6%~21.5%左右,并可提高堆体腐熟度,促进类腐殖质物质产生。添加生物炭可缩短发酵升温期并延长高温期,更有利于堆体消纳沼液。沼液喷淋与秸秆和生物炭联合好氧发酵工艺可达到利用沼液生产有机肥的目的,是资源化利用沼液的有效途径之一。

**关键词:**秸秆;发酵;生物炭;沼液;喷淋;资源化利用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.031

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1002-6819(2019)-19-0252-07

丁京涛,马艳茹,沈玉君,程红胜,孟海波,宋立秋,张朋月.沼液喷淋秸秆与生物炭联合好氧发酵效果研究[J]农业工程学报,2019,35(19):252—258. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.031 <http://www.tcsae.org>

Ding Jingtao, Ma Yanru, Shen Yujun, Cheng Hongsheng, Meng Haibo, Song Liqui, Zhang Pengyue. Effect of corn stalk and biochar aerobic fermentation combined with biogas slurry spraying [J] Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 252—258. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.031 <http://www.tcsae.org>

### 0 引 言

目前中国大部分沼气工程面临大量沼液无法消纳的问题,已经成为限制沼气工程正常运行、制约中国生物天然气产业发展的主要因素之一<sup>[1-4]</sup>。沼液含有丰富的氮、磷、钾等营养元素和铁、铜、锰等微量元素,是一种优质的资源,如何研发低成本的处理技术,实现沼液无害化消纳、资源化利用一直以来是中国学者研究的热点<sup>[5-8]</sup>。

近年来,国内外已有一些研究和应用利用好氧发酵处理养殖粪水、沼液、酒精废液等高浓度有机废水<sup>[9]</sup>,该技术可以弥补畜禽粪便和秸秆单独好氧发酵时的氮源不足、臭气排放严重等不利因素,同时可以解决粪水、沼液单独处理费用高的问题<sup>[10-13]</sup>。秸秆、生物炭对沼液中的悬浮物及营养元素有较好的吸附过滤作用,同时生物炭具有除臭的功效。张智焯等<sup>[14]</sup>分析了玉米秸秆作为一种预过滤材料对猪粪发酵沼液的过滤效果,发现沼液

经秸秆吸附后,化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)和总悬浮物(total suspended solid, TS)的去除率分别达到了50%和60%以上,总氮(total nitrogen, TN)的去除率约为10%~15%,总磷(total phosphorus, TP)的去除率最高可达45%,验证了玉米秸秆作为沼液预过滤材料的可行性。在利用秸秆好氧发酵处理沼液方面,邓良伟等<sup>[12]</sup>以玉米秆、稻草、麦秆为载体吸收猪场沼液的发酵试验,证明了秸秆好氧发酵处理沼液的可行性。李瑞鹏等<sup>[13]</sup>用麦秸和养殖废水(沼液或牛粪水)混合好氧发酵,结果表明每处理1.0 t麦秸可消纳废水1.8 t,有利于奶牛场节本增效。张晴雯等<sup>[15]</sup>将作物秸秆、沼液、粪便等废弃物混合好氧发酵制备生物肥料,总养分含量(N<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O)≥20%,有效促进农作物增产增收。虽然目前中国部分学者对秸秆和沼液联合发酵生产有机肥的技术有一定程度的研究,但总体尚处于试验研究阶段<sup>[16]</sup>,尚未就沼液喷淋与秸秆联合好氧发酵效果开展相关研究。在秸秆与沼液好氧发酵过程中,秸秆作为发酵的原料,有机质含量低,而生物炭优良的吸附性能,可以吸附沼液中的有机质、氮磷等养分元素<sup>[17]</sup>,为微生物提供良好的生存环境,延长发酵高温期<sup>[18]</sup>。本研究以好氧发酵过程中最大消纳沼液为目标,分析了玉米秸秆对猪粪沼液和鸡粪沼液的吸附过滤效果,利用吸附后的秸秆开展

收稿日期:2019-04-22 修订日期:2019-08-25

基金项目:农业农村部规划设计研究院自主研发项目(2018ZZYF0202)

作者简介:丁京涛,博士,主要从事农业废弃物资源化利用技术研发。

Email:dingjingtao@163.com

※通信作者:孟海波,研究员,主要从事循环农业与农业废弃物资源

化利用技术研发。Email:newsmbh7209@163.com

好氧发酵试验,分别分析了猪粪沼液和鸡粪沼液喷淋对堆体好氧发酵效果及发酵产品品质的影响,以期为沼气工程剩余沼液和农作物秸秆的综合处理提供理论依据及技术参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

玉米秸秆取自北京周边农田,粉碎至 3~5 cm;鸡粪

沼液取自大兴区以鸡粪为发酵原料的某沼气工程,猪粪沼液取自顺义区以猪粪为发酵原料的某沼气工程;发酵调理剂为猪粪,取自北京市顺义区东华山某养猪场;生物炭为玉米秸秆经自主研发的连续式热解炭化设备热解而成,热解温度为 650℃,生物炭比表面积为 21.66 m<sup>2</sup>/g,孔隙率为 68.71%,平均孔隙孔径为 2.18 μm。玉米秸秆、沼液、猪粪和生物炭基本理化特性见表 1。

表 1 好氧发酵物料理化性质  
Table 1 Physic-chemical properties of aerobic fermentation materials

| 指标<br>Index                                 | 猪粪沼液<br>Biogas slurry of pig manure | 鸡粪沼液<br>Biogas slurry of chicken manure | 猪粪<br>Pig manure | 玉米秸秆<br>Corn stalks | 生物炭<br>Biochar |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|---------------------|----------------|
| pH 值 pH value                               | 7.14                                | 7.77                                    | 6.58             | —                   | —              |
| 含水率 Moisture content/%                      | —                                   | —                                       | 67.76            | 5.92                | 7.35           |
| 含固率 Solid content /%                        | 0.64                                | 0.16                                    | —                | —                   | —              |
| 化学需氧量 COD /(mg·L <sup>-1</sup> )            | 802 1.1                             | 245 16.0                                | —                | —                   | —              |
| 总氮 Total nitrogen /( mg·L <sup>-1</sup> )   | 363 1.4                             | 104 59.2                                | —                | —                   | —              |
| 总磷 Total phosphorus /( mg·L <sup>-1</sup> ) | 25.52                               | 168.71                                  | 1.62%            | 0.31%               | —              |
| 总钾 Total potassium /( mg·L <sup>-1</sup> )  | 838.05                              | 232 4.26                                | 0.95%            | 2.30%               | —              |
| 总碳质量分数 Total carbon mass fraction /%        | —                                   | —                                       | 38.52            | 38.38               | 69.03          |
| 总氮质量分数 Total nitrogen mass fraction /%      | —                                   | —                                       | 4.82             | 0.58                | 1.32           |
| 碳氮比 Carbon nitrogen ratio                   | —                                   | —                                       | 7.99             | 66.17               | 52.30          |

1.2 试验设计

试验于 2018 年 5 月至 11 月期间开展,共设置 6 个处理(见表 2)。将粉碎后的秸秆填充于自主研发的沼液动态吸附过滤装置,对沼液进行过滤吸附,直至滤出沼液浓度与原沼液浓度比值相同时,回收过滤填料秸秆,过滤后的沼液备用。以填料秸秆为原料,以猪粪为调理剂,用沼液调节物料含水率为 65%~70%,C/N 至 25~30,生物炭添加量为秸秆质量的 20%<sup>[19]</sup>,将秸秆与调理剂按照质量比 1:1 的比例混合均匀后填充至自主研发的静态好氧发酵

装置 3/4 的位置,发酵罐容积为 50 L(图 1)。发酵试验周期为 30 d,每隔 45 min 鼓风曝气 1 次,通风时间 5~7 min,通风量为 0.25~0.3 L/(kg·min),同时进行沼液喷淋和翻抛处理。当堆体温度上升到 50℃ 以上时开始进行沼液喷淋,平均每 3 d 喷淋 1 次,喷淋量取决于堆体含水率,即每次喷淋量控制在堆体含水率 60%~65% 之间,T2、T4 的喷淋时间和喷淋量为:发酵第 6 天分别为 1.6、2.3 L,发酵第 9 天分别为 1.0、2.0 L,发酵第 12 天分别为 0.6、1.0 L,发酵第 15 天分别为 0.7、0.5 L,发酵第 18 天分别为 0.4、0.3 L。

表 2 试验处理  
Table 2 Experimental treatments

| 处理编号<br>Treatment No. | 沼液种类<br>Types of biogas slurry | 发酵物料<br>Fermentation material | 喷淋翻抛<br>Spraying and mixing | 总喷淋量<br>Spraying amount /L |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| CK1                   | 猪粪沼液                           | 秸秆+猪粪调理剂                      | —                           | —                          |
| CK2                   | 鸡粪沼液                           | 秸秆+猪粪调理剂                      | —                           | —                          |
| T1                    | 猪粪沼液                           | 秸秆+猪粪调理剂+生物炭                  | —                           | —                          |
| T2                    | 猪粪沼液                           | 秸秆+猪粪调理剂+生物炭                  | 猪粪沼液喷淋翻抛                    | 4.3                        |
| T3                    | 鸡粪沼液                           | 秸秆+猪粪调理剂+生物炭                  | —                           | —                          |
| T4                    | 鸡粪沼液                           | 秸秆+猪粪调理剂+生物炭                  | 鸡粪沼液喷淋翻抛                    | 6.1                        |

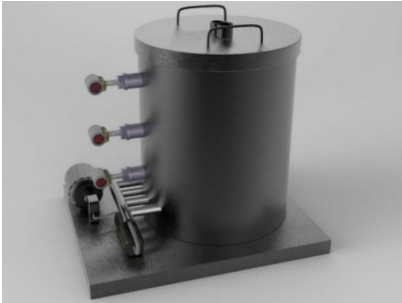


图 1 好氧发酵反应器示意图

Fig. 1 Diagram of aerobic fermentation reactor

1.3 样品采集与分析

根据沼液喷淋的间隔,样品采集时间分别是第 0、3、6、9、12、15、18、21、25、30 天,分别从发酵物料的上、中、

下位置取样,并充分混匀组成混合样品,每次样品采集 400 g 左右,取出一部分样品进行 pH 值、含水率等指标的即时检测,其余鲜样置于冰箱中保存备用,用于测定堆体总氮、总磷、总钾(total K, TK)元素、腐殖质、有机质、种子发芽指数(germination index, GI)等指标的检测,检测时分别采用 3 组平行。本试验中温度的测定采用发酵罐内温度探头实时进行监测。

有机碳采用 0.4 mol/L K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 外加热法进行测定。将样品中添加水 10 mL/g, 200 r/min 振荡浸提 1 h,离心(4 000 r/min) 10 min,过滤得到上清液, pH 值用上海雷磁 PHS-3C 型 pH 计测定, GI 的测定方法参考文献<sup>[20]</sup>,堆体中水溶性有机物(dissolved organic matter, DOM)的

三维荧光光谱特征扫描方法参考文献<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Origin 9.0 分析数据并作相关性分析,并设定  $P < 0.05$  为显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆吸附沼液特性分析

粉碎后玉米秸秆吸水能力较好,吸附过滤猪粪沼液、鸡粪沼液后,秸秆含水率由 5.92% 分别上升至 76.35% 和 85.72%,碳(C)质量分数由 38.12% 分别上升至 82.30% 和 67.20%,氮(N)质量分数由 0.90% 分别上升至 1.64% 和 1.30%,碳氮比(C/N)由 42.4 分别上升至 50.2 和 51.7。《堆肥工程实用手册(第二版)》<sup>[22]</sup>建议好氧发酵适宜的 C/N

在 20~40 之间,含水率在 40%~65% 之间,可见,玉米秸秆吸附过滤沼液后,不能直接进行好氧发酵,需要添加一定量的调理剂将含水率和 C/N 调到适宜的范围。玉米秸秆对沼液中 TS、TP、TK、TN 的吸附过滤效果依次降低,经秸秆吸附过滤后,沼液 pH 值基本没有变化,猪粪沼液和鸡粪沼液 TS 含量分别降低了 34.42% 和 43.78%,TP 浓度分别降低了 41.01% 和 20.00%,TK 浓度分别降低了 25.00% 和 13.00%,TN 浓度分别降低了 18.00% 和 8.00% (见表 3)。这是由于秸秆对沼液主要以过滤作用为主,沼液中的 TN、TK 主要以水溶形态存在于液相,秸秆吸附过滤对其去除率较低,而 TP 更多以固相形态存在于悬浮物中,使得秸秆对沼液中 TS 和 TP 去除率较高。

表 3 秸秆吸附过滤猪粪沼液、鸡粪沼液前后沼液理化特性变化

Table 3 Changes of physicochemical properties of pig manure biogas slurry and chicken manure biogas slurry before and after corn stalks adsorption filtration

| 项目<br>Items                   | 猪粪沼液 Pig manure biogas slurry |                         | 鸡粪沼液 Chicken manure biogas slurry |                         |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
|                               | 吸附过滤前 Before corn stalks      | 吸附过滤后 After corn stalks | 吸附过滤前 Before corn stalks          | 吸附过滤后 After corn stalks |
|                               | adsorption filtration         | adsorption filtration   | adsorption filtration             | sorption filtration     |
| 总氮 TN / (mg·L <sup>-1</sup> ) | 3 631.06±136.34               | 2 977.47±126.12         | 10 459.05±556.12                  | 9 622.33±496.32         |
| 总磷 TP / (mg·L <sup>-1</sup> ) | 25.14±5.32                    | 14.83±2.55              | 168.13±10.55                      | 134.504±18.32           |
| 总钾 TK / (mg·L <sup>-1</sup> ) | 838.05±97.53                  | 628.54±41.13            | 2 324.26±121.13                   | 2 022.11±117.53         |
| 总固体 TS / %                    | 0.16±0.02                     | 0.09±0.01               | 0.64±0.00                         | 0.42±0.01               |

### 2.2 联合好氧发酵温度变化

温度可影响微生物活动能力,进而影响微生物对有机物料的腐解,堆体温度变化是反映发酵是否正常最直接、最敏感的指标。由图 2 可知,随着好氧发酵的进行,各处理的总体温度呈先上升后下降再趋于稳定,各处理发酵高温期( $\geq 50^{\circ}\text{C}$ )均持续了 5 d 以上,其中 T2 和 T4 分别持续了 12 和 14 d, T1 和 T3 分别持续了 5 和 7 d,各处理均达到了《粪便无害化卫生要求》(GB 7959-2012)<sup>[23]</sup>规定的机械发酵高温期  $50^{\circ}\text{C}$  以上持续至少 2 d 的无害化要求。添加生物炭的处理 T1、T2、T3、T4 堆体温度分别在第 5 天、第 4 天、第 6 天、第 4 天达到  $50^{\circ}\text{C}$  以上,而未添加生物炭的处理 CK1 和 CK2 在第 8 天才达到  $50^{\circ}\text{C}$  以上,且高温期持续较短,均为 5 d。统计分析可知,添加生物炭可显著缩短好氧发酵升温期并延长高温期( $P < 0.01$ )。这是由于生物炭具有高的稳定性、发达的孔隙结构、大的比表面积、丰富的表面官能团和很强的吸附能力,有利于减小堆积密度和增加通气性,提高堆体的温度,延长高温期<sup>[24-25]</sup>,而高温期的延长更有利于堆体消纳沼液<sup>[12,26]</sup>。

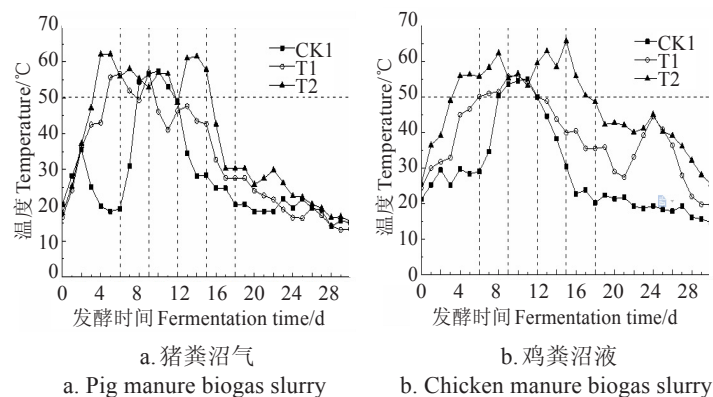


图 2 好氧发酵过程温度变化

Fig. 2 Changes of temperature during fermentation

沼液喷淋翻抛可显著延长发酵高温期( $P < 0.01$ ),采用沼液喷淋翻抛的方式, T2 堆体高温期持续时间是 T1 的 2.4 倍, T4 堆体高温期持续时间是 T3 的 2 倍。无论是猪粪沼液还是鸡粪沼液,在前 3 次喷淋翻抛后,堆体温度均上升,这可能是由于沼液喷淋后,增加了新的有机物,且翻抛改善了堆体的通气性,促进了物料的混合,使得残留的有机物继续分解,引起堆体温度再次升高。第 4 次沼液喷淋翻抛后, T2 和 T4 堆体温度均未上升,堆体开始降温,但温度仍在  $50^{\circ}\text{C}$  以上;第 5 次沼液喷淋翻抛也并未引起堆体温度上升,堆体温度已低于  $50^{\circ}\text{C}$ , T2 和 T4 均处于降温期,这主要是因为高温期造成微生物的死亡和活性普遍降低,且残余的有机物较难分解,堆体发热量减少,导致温度开始下降,好氧发酵进入腐熟阶段。

### 2.3 联合好氧发酵过程 pH 值和含水率变化

pH 值是影响堆体微生物生长繁殖的重要因素之一。图 3 是好氧发酵过程中堆体 pH 值变化情况,可见,除 CK2 外各处理在好氧发酵的最初阶段(前 4 d 左右) pH 值逐渐下降,这是由于易分解的有机物经微生物转化为有机酸,有机酸累积使物料 pH 值下降;随着发酵的持续进行,有机酸被进一步分解,温度的升高也使部分有机酸挥发,同时含氮物质分解产生氨氮,因而各处理 pH 值快速上升后趋于稳定,猪粪沼液、鸡粪沼液与秸秆联合好氧发酵 pH 值最后分别稳定在 9.0 和 9.5,均高于未进行沼液喷淋翻抛的处理,这可能是由于沼液 pH 值为碱性,含有高浓度的氨氮,喷淋翻抛后使得堆体 pH 值升高,且由于鸡粪沼液 pH 值高于猪粪沼液 pH 值,使得鸡粪沼液与秸秆联合好氧发酵的堆体 pH 值较高,该现象与邓良伟等的研究趋势一致<sup>[12]</sup>。

含水率是好氧发酵过程的重要参数,通常情况下,水

分偏低或者偏高,会影响堆体微生物活性和堆体通气性,导致堆体温度变化。图4是好氧发酵过程中堆体含水率变化情况,可见,沼液喷淋翻抛对堆体含水率的影响较大,T2和T4处理在沼液喷淋翻抛前,与其他处理相似,堆体含水率呈下降趋势,由于每次沼液喷淋翻抛需要控制堆体含水率在60%~65%之间,使得T2和T4处理堆体含水率在高温期基本保持在60%~65%之间,而其余处理堆体含水率不断下降,发酵末期含水率约为47%左右。

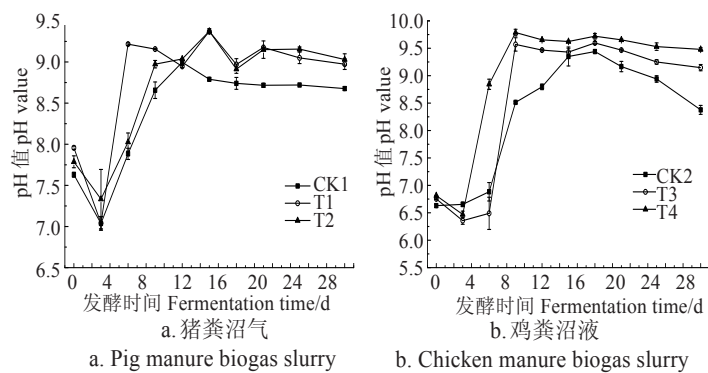


图3 联合好氧发酵过程pH值变化  
Fig.3 Changes of pH value during fermentation

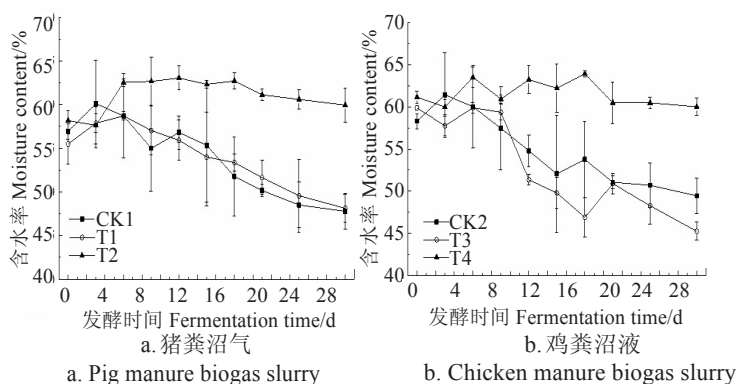


图4 好氧发酵过程含水率变化  
Fig.4 Changes of moisture contents during fermentation

## 2.4 联合好氧发酵前后养分含量特性变化

有机质是好氧发酵过程中微生物赖以生存和繁殖的基本物质,其含量变化能在一定程度上反映了发酵的进程<sup>[13]</sup>。图5可以看出,各处理在发酵结束后,堆体有机质含量均有不同程度的降低。猪粪沼液与秸秆联合好氧发酵30 d后,CK1、T1和T2处理有机质含量分别降低了5.24%、9.03%和14.97%,T2处理的有机质含量下降幅度最大,CK1最小;鸡粪沼液与秸秆联合好氧发酵30 d后,CK2、T3和T4处理有机质含量分别降低了6.53%、10.42%和18.63%,T4处理的有机质含量下降幅度最大,CK2最小。可见,堆体高温期持续时间越长,有机质含量降低越明显,这是因为高温期持续时间反映了微生物活性强度,高温加速了有机质的分解。此外,生物炭的添加明显提高了堆体有机质的降解,猪粪沼液与秸秆、鸡粪沼液与秸秆堆体有机质降解率分别提高了72.17%和59.45%,这可能是添加生物炭更有利于减小堆积密度和增加通气性,可为硝化细菌等微生物群落提供适宜的环境,减少了氮损失,改善了微生物生境条件<sup>[27-28]</sup>。

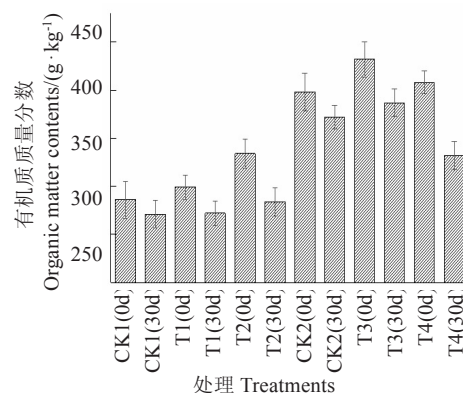


图5 不同堆体发酵前后有机质质量分数变化  
Fig. 5 Changes of organic matter contents of composts before and after fermentation

图6为各处理好氧发酵前后堆体N、P、K含量变化情况,可以看出,各处理N、P、K含量均有不同程度的提高。猪粪沼液与秸秆联合好氧发酵30 d后,T2处理N、P、K总含量提高了37.69%,CK1和T1分别提高了16.94%和20.77%;鸡粪沼液与秸秆联合好氧发酵30 d后,T4处理N、P、K含量提高了49.40%,CK2和T3分别提高了12.62%和18.13%。这可能是由于好氧发酵过程的浓缩效应减少了堆体体积,从而提高了N、P、K含量;添加生物炭(未进行沼液喷淋翻抛)可提高堆体N、P、K含量,但增幅不大;而经过沼液喷淋处理的堆体N、P、K含量较未喷淋的处理总含量提高了6%~21.5%左右,这主要是因为沼液本身含有一定量的N、P、K元素。其中,P和K含量提高幅度大于氮素含量,T2堆体的P和K含量分别提高了56.25%和49.28%,而N含量提高了26.49%,T4堆体的P和K含量分别提高了65.57%和58.56%,而N含量提高了38.38%,这可能是因为好氧发酵过程中由于氨氮的挥发和氧化为硝酸盐氮后的反硝化,使得N素有分解损失,而P和K不存在分解损失,因此,在沼液喷淋后,虽然沼液中N含量高于P和K含量,但经过高温发酵后,堆体中P和K不断积累,其绝对量和相对量均有增加,这与邓良伟等的研究结果一致<sup>[12]</sup>。

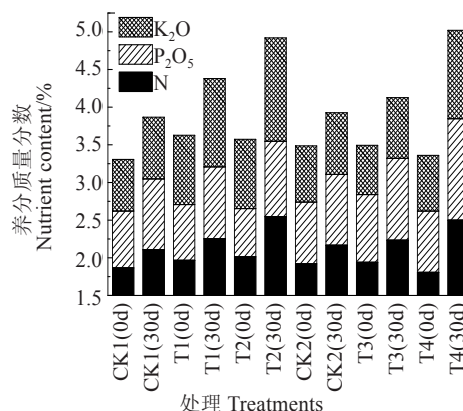


图6 不同堆体好氧发酵前后氮磷钾含量变化  
Fig. 6 Changes of NPK contents of composts before and after fermentation

## 2.5 联合好氧发酵物料腐熟特性分析

联合好氧发酵结束后,CK1、CK2、T1、T2、T3和T4的种子发芽指数GI分别达到82.88%、84.06%、93.21%、

107.18%、91.13% 和 100.71%，当 GI 达到 80%~85%，即可以认为堆体达到腐熟<sup>[18]</sup>，可见，本试验中所有处理发酵结束后均达到腐熟状态。腐植酸在 465、665 nm 处吸光度之比  $E_4/E_6$  能反映腐植酸分子的稳定程度，能揭示好氧发酵腐熟过程的生物行为<sup>[29-30]</sup>。 $E_4/E_6$  越小，表示分子中芳香环的缩合度、芳构化度和分子量均越大，平均停留时间越长<sup>[31]</sup>。由图 7 可知，在好氧发酵 0~3 d， $E_4/E_6$  呈降低趋势，这可能是由于发酵升温期，秸秆类原料中木质素经微生物降解转化，木质素降解及苯丙烷与氨基酸的共聚合作用能形成高分子质量混合物<sup>[32]</sup>，导致  $E_4/E_6$  值降低。在发酵第 4~15 天， $E_4/E_6$  呈增加趋势，这主要是由于堆体微生物活性逐渐增强，将糖类、蛋白质等易分解的有机物质分解为简单的有机物或无机物，导致  $E_4/E_6$  值增大<sup>[31]</sup>。在发酵第 15 天左右， $E_4/E_6$  出现峰值，此时堆体生物化学活性最高，有机物质最不稳定，15 d 之后，腐殖化过程大分子有机物的合成作用大于其降解过程，不饱和物质的缩合度及芳构化程度增加，小分子腐殖酸向着大分子腐殖酸转化<sup>[33]</sup>， $E_4/E_6$  呈现降低趋势。发酵结束后，T2 和 T4 的  $E_4/E_6$  明显低于 CK1 和 CK2 的  $E_4/E_6$ ，这说明了沼液喷淋提高了发酵腐熟度，同时使分子中芳香环的缩合度和芳构化程度更大。

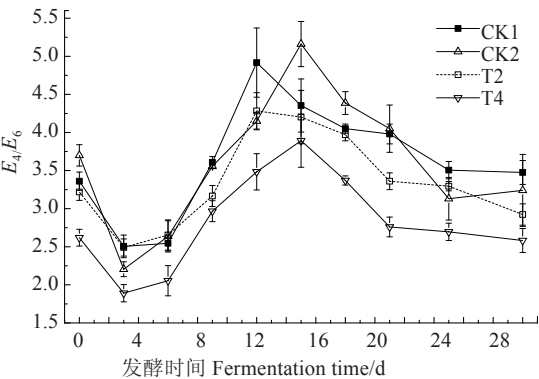


图 7 不同处理在好氧发酵过程中  $E_4/E_6$  的变化趋势  
Fig.7 Changes of  $E_4/E_6$  of different treatments during fermentation

堆体 DOM 是微生物最容易利用的营养源，被认为是堆体有机质中最活跃的部分，能反映出好氧发酵过程中有机质的结构演变<sup>[34]</sup>。DOM 三维荧光光谱能有效显示堆体 DOM 的组分特征。DOM 三维荧光光谱可分为 5 个区域，I 区为类酪氨酸物质荧光峰，II 区为类色氨酸物质荧光峰，III 区是类富里酸荧光峰，IV 区的物质则与微生物代谢产物和微生物残体有关，V 区是类腐殖质物质产生的荧光峰；其中 I 区和 II 区可统一为类蛋白质荧光峰区，III 区和 V 区均为类腐殖质荧光峰区<sup>[35]</sup>。图 8 是 T4 处理好氧发酵前后 DOM 三维荧光光谱图，可见，在发酵初期，I 区和 II 区为类蛋白质物质主要荧光峰，这是由于猪粪中粗蛋白、氨基酸类物质尚未被微生物大量分解，堆体有机质聚合度低，类腐殖质物质尚未明显出现；随着发酵的进行，在发酵末期类腐殖质类物质大量出现，V 区出现明显的荧光峰，这与唐朱睿等<sup>[21]</sup>的研究结果类似。

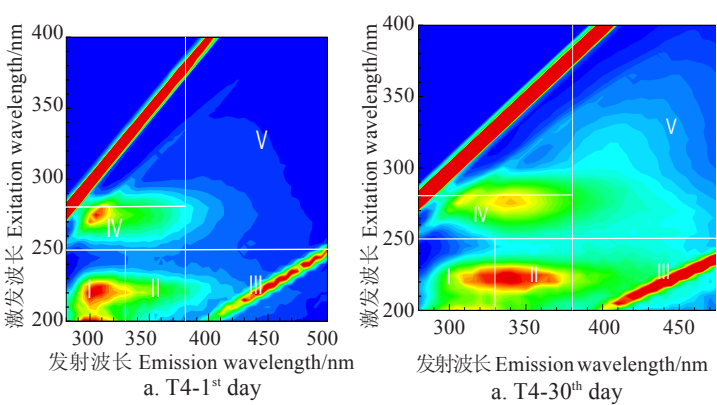


图 8 T4 处理堆体 DOM 三维荧光图  
Fig.8 Three-dimensional fluorescence spectra of DOM in T4

3 结 论

1) 粉碎后玉米秸秆的吸水能力及其对沼液中悬浮物吸附过滤效果较好，1 kg 秸秆(初始含水率 5.92%)可吸收沼液中 0.7 kg 的水分，对沼液中以固相形态存在的 TS、TP 的吸附过滤效果较好，过滤后沼液 TS 含量降低了 34.42%~43.78%，TP 浓度降低了 20.00%~41.01%，而对溶解态的 TN、TK 吸附过滤效果一般。粉碎后玉米秸秆吸附过滤沼液后，C/N 为 50 左右，不宜直接好氧发酵，需要添加一定量的调理剂。沼液喷淋和秸秆联合好氧发酵工艺可达到沼液减量化处理和营养元素资源回收利用生产有机肥的目的，具有较好的环境效益、社会效益和经济效益。同时该工艺可应用于槽式发酵等其他好氧发酵工艺，运行效果还有待于进一步研究。

2) 沼液喷淋翻抛可显著延长堆体发酵高温期 2 倍以上，有效促进堆体有机质降解，提高氮磷钾含量达 2 倍左右，促进了发酵腐熟，另外，同时，添加生物炭(质量比 20%)有利于减小堆积密度和增加通气性，可显著缩短好氧发酵升温期并延长高温期，有利于堆体消纳沼液，促进有机物的分解(有机物降解率分别提高了 59.45%~72.17%)。此外，一方面沼液喷淋工艺还需进一步优化，另一方面不同生物炭添加量对沼液喷淋和秸秆联合发酵的影响效果也需要进一步研究。

[参考文献]

[1] 郑绸, 冉瑞平, 陈娟. 畜禽养殖废弃物市场化困境及破解对策: 基于四川邛崃的实践[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 70—77. Zheng Chou, Ran Ruiping, Chen Juan. Marketing dilemma and counter measures for livestock and poultry wastes: Based on the successful practice in Qionglai of Sichuan[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(3): 70—77. (in Chinese with English abstract)

[2] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 大中型沼气工程厌氧发酵液的后处置技术[J]. 中国沼气, 2010, 28(1): 14—20. Chen Yucheng, Yang Zhimin, Chen Qinghua, et al. An overview on disposal of anaerobic digestate for large scale biogas engineering[J]. China Biogas, 2010, 28(1): 14—20. (in Chinese with English abstract)

[3] 梁康强, 阎中, 魏泉源, 等. 沼气工程沼液高值的利用研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(32): 198—203. Liang Kangqiang, Yan Zhong, Wei Quanyuan, et al. Research of the high value use of biogas slurry from biogas projects[J]. Chi-

- nese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 198—203. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马艳茹, 丁京涛, 赵立欣, 等. 沼液中氮的回收利用技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(3): 339—344.  
Ma Yanru, Ding Jingtao, Zhao Lixin, et al. Advances in recycling and reuse of nitrogen from biogas slurry[J]. Environmental Pollution and Control, 2018, 40(3): 339—344. (in Chinese with English abstract)
- [5] Deng Xiangyuan, Gao Kun, Zhang Renchuan, et al. Growing *Chlorella vulgaris* on thermophilic anaerobic digestion swine manure for nutrient removal and biomass production[J]. Bioresour Technol, 2017, 243: 417—425.
- [6] Hu Bin, Jiang Meng, Zhao Shuwei, et al. Biogas slurry as draw solution of forward osmosis process to extract clean water from micro-polluted water for hydroponic cultivation[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 576: 88—95.
- [7] 丁京涛, 张朋月, 华冠林, 等. 北京大中型沼气工程冬季运行状况及发酵前后物料理化生物特性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 213—220.  
Ding Jingtao, Zhang Pengyue, Hua Guanlin, et al. Running status of large and medium scale biogas project and physical, chemical and biological characteristics of materials before and after fermentation in winter of Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(23): 213—220. (in Chinese with English abstract)
- [8] 周文兵, 靳渝鄂, 肖乃东. 沼液无害化处理和资源化利用研究进展及发展建议[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊1): 115—122.  
Zhou Wenbing, Jin Yu'e, Xiao Naidong. Study progress and development suggestions on harmless treatment and resource utilization of biogas slurry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(Suppl 1): 115—122. (in Chinese with English abstract)
- [9] Hou Y, Velthof G L, Case S D C, et al. Stakeholder perceptions of manure treatment technologies in Denmark, Italy, the Netherlands and Spain[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1620—1630.
- [10] 陈立平, 陈开正, 吴鸿翔, 等. 采用生物热能蒸发处理糖蜜酒精废液[J]. 环境科学研究, 2000, 13(3): 60—62.  
Chen Liping, Chen Kaizheng, Wu Hongxiang, et al. Treatment of waste liquid of molasses alcohol by use of the bioenergy[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(3): 60—62. (in Chinese with English abstract)
- [11] Paredes C, Roig A. Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 32(3): 222—227.
- [12] 邓良伟, 谭小琴, 李建, 等. 利用秸秆堆肥过程处理猪场废水的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 255—259.  
Deng Liangwei, Tan Xiaoqin, Li Jian, et al. Treatment and reuse of piggery wastewater by composting process of straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(6): 255—259. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李瑞鹏, 于建光, 常志州, 等. 麦秸和奶牛场废弃物联合堆肥试验[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(1): 65—71.  
Li Ruipeng, Yu Jianguang, Chang Zhizhou, et al. Co-composting of wheat straw and dairy waste [J]. Jiangsu J of Agr Sci, 2012, 28(1): 65—71. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张智烨, 李国学, 袁京, 等. 玉米秸秆滤料对猪粪发酵沼液过滤效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1985—1992.  
Zhang Zhiye, Li Guoxue, Yuan Jing, et al. Effect of corn stalk for filtrating biogas slurry fermented from swine manure[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4): 1985—1992. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张晴雯, 李贵春, 郑莉, 等. 一种沼液生物肥料及其制备方法: CN108017452A, 2018-05-11[P]
- [16] 邓玉莹, 黄振兴, 阮文权, 等. 沼液回流比与有机负荷对秸秆厌氧发酵特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 198—206, 133.  
Deng Yuying, Huang Zhenxing, Ruan Wenquan, et al. Effect of digestate recirculation ratio and organic loading rate on fermentation characteristics for anaerobic digestion of straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 198—206, 133. (in Chinese with English abstract)
- [17] Simon Kizito. 沼液氮磷养分生物炭吸附回收及农田利用可行性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
Simon Kizito. Effectiveness of Biochar Use for Nitrogen and Phosphorus Recovery from Liquid Anaerobic Digestate and Potential Land Application[D]. Beijing: Chinese Agricultural University. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李冉, 孟海波, 赵立欣, 等. 微生物和生物炭联用对猪粪堆肥后重金属Pb和Cd的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 164—169.  
Li Ran, Meng Haibo, Zhao Lixin, et al. Immobilization effect of Pb and Cd during composting of pig manure by combination of biochar and microbial agent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(23): 164—169. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李冉, 孟海波, 沈玉君, 等. 改性生物炭对猪粪堆肥过程重金属钝化效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2304—2311.  
Li Ran, Meng Haibo, Shen Yujun, et al. Immobilization of heavy metals by modified biochar during composting of pig manure[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(10): 2304—2311. (in Chinese with English abstract)
- [20] 侯月卿, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 205—214.  
Hou Yueqing, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Passivating effect of biochar and humic acid materials on heavy metals during composting of pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 205—214. (in Chinese with English abstract)
- [21] 唐朱睿, 席北斗, 何小松, 等. 猪粪堆肥过程中水溶性有机物结构演变特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2018(5): 1526—1532.  
Tang Zhurui, Xi Beidou, He Xiaosong, et al. Structural Characteristics of dissolved organic compounds during swine manure composting[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018(5): 1526—1532. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [23] 粪便无害化卫生要求: GB 7959-2012 [S].
- [24] Czekala W, Malinska K, Caceres R, et al. Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar—the effect of biochar on temperature and C-CO<sub>2</sub> emission [J]. Bioresour Technol, 2016, 200: 921—927.
- [25] Li R, Wang Q, Zhang Z, et al. Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures [J]. Environ Technol, 2015, 36(5/6/7/8): 815—826.
- [26] 杜龙龙, 张智烨, 王蒙, 等. 沼液一体化综合处理与循环利用工艺[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 207—212.  
Du Longlong, Zhang Zhiye, Wang Meng, et al. Research on comprehensive integration process and recycling technologies of biogas slurry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Suppl. 2): 207—212. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘宁, 周嘉良, 马双双, 等. 生物炭对鸡粪好氧堆肥主要氮素形态

- 含量影响与保氮机制[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 233—239.
- Liu Ning, Zhou Jialiang, Ma Shuangshuang, et al. Impact of biochar on major forms contents and conservation mechanism of nitrogen during aerobic composting of chicken manure[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 233—239. (in Chinese with English abstract)
- [28] Du Jingjing, Zhang Yuyan, Hu Bin, et al. Insight into the potentiality of big biochar particle as an amendment in aerobic composting of sewage sludge[J]. Bioresour Technol, 2019, 288: 121469.
- [29] 谷洁, 李生秀, 秦清军, 等. 微生物及胡敏酸 E4/E6 值在农业废弃物静态高温腐解中的变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005(12): 98—102, 106.
- Gu Jie, Li Shengxiu, Qin Qingjun, et al. Changes of microorganisms and E4/E6 in agricultural waste materials during composting in static state with high temperatura[J]. Jour Of Northwest Sci-Tech Univ of Agri And For: Nat Sci Ed, 2005(12): 98—102, 106. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李怨艳, 李吉进, 张邦喜, 等. 菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 268—274.
- Li Shuyan, Li Jijin, Zhang Bangxi, et al. Influence of inoculants on content and quality of humus during chicken manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Suppl 2): 268—274. (in Chinese with English abstract)
- [31] Shan Y N, Chen J H, Wang L, et al. Influences of adding easily degradable organic waste on the minimization and humification of organic matter during straw composting[J]. J Environ Sci Health B, 2013, 48(5): 384—392.
- [32] 薛兆骏, 彭永臻, 王鹏鹞, 等. 自发热持续高温好氧堆肥碳、氮、腐殖酸变化过程[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4094—4098.
- Xue Zhaojun, Peng Yongzhen, Wang Pengyao, et al. The transformation regularities of carbon, nitrogen and humic acid during high temperature aerobic composting process[J]. China Environmental Science, 2018, 38(11): 4094—4098. (in Chinese with English abstract)
- [33] 鲍艳宇, 颜丽, 娄翼来, 等. 鸡粪堆肥过程中各种碳有机化合物及腐熟度指标的变化[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 820—824.
- Bao Yanyu, Yan Li, Lou Yilai, et al. Dynamics of organic carbons during composting of chicken manure and evaluation of maturity parameters[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(4): 820—824. (in Chinese with English abstract)
- [34] Wei Ziming, Wang Xueqin, Zhao Xinyu, et al. Fluorescence characteristics of molecular weight fractions of dissolved organic matter derived from composts[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 113: 187.
- [35] He Xiaosong, Xi Beidou, Wei Ziming, et al. Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy with regional integration analysis for characterizing composition and transformation of dissolved organic matter in landfill leachates[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1/2/3): 293.

## Effect of corn stalk and biochar aerobic fermentation combined with biogas slurry spraying

Ding Jingtao, Ma Yanru, Shen Yujun, Cheng Hongsheng, Meng Haibo\*, Song Liquu, Zhang Pengyue

(1. Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering Planning & Design, Beijing 100125, China; 2. Key Laboratory of Technologies and Models for Cyclic Utilization from Agricultural Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

**Abstract:** At present, the demand for the quantitative reduction and resources recovery of biogas slurry is increasing rapidly. In this study, an aerobic fermentation experiment of biogas slurry with biochar and corn stalks after adsorbing and filtering the biogas slurry, was conducted to investigate the effect of biogas slurry spraying to the fermentation, and the effect of co-fermentation with corn straw and biochar was also analyzed. The results indicated that crushed corn straws had better water absorbing ability and suspended matter filtering ability. Moisture content of crushed corn straws, after adsorbing and filtering the biogas slurry of pig manure and chicken manure, increased from 5.92% to 76.35% and 85.72%, and the carbon nitrogen ratio increased from 42.4 to 50.2 and 51.7, respectively. Due to the effect of corn stalks adsorption filtration, total suspended matter and total phosphorus in the biogas slurry of pig manure and chicken manure decreased 34.42%-43.78% and 20.00%-41.01%, respectively. The adsorption and filtering effects of crushed corn stalks to the total phosphorus and total potassium were not significant in slurry. After adsorption saturation, carbon nitrogen ratio of corn stalks was not suitable for aerobic fermentation, indicating amendments were important assistant materials in the composting process. Biogas slurry spraying and compost turning could prolong the duration of high temperature phase more than 2 times during fermentation. The addition of biochar to the compost could shorten the temperature raising period and prolong the high temperature period, which could be benefit of utilizing biogas slurry. The content of nitrogen, phosphorus and potassium were found to increase constantly in the composting process. After aerobic fermentation, organic matter content of fermentation materials with slurry spraying decreased by 10.42%-18.63% and the total contents of nitrogen, phosphorus and potassium increased by 6%~21.5% compared to other treatments without slurry spraying. The compost maturity of fermentation materials with slurry spraying was also improved. The test results demonstrated that the technology of corn stalk and biochar aerobic fermentation combined with biogas slurry spraying could be feasible to make use of quantitative reduction and resources recovery of biogas slurry to produce organic fertilizer, which had better environmental, social and economic benefits. Meanwhile, there are some further studies are needed to conduct. Firstly, process parameter optimization of the technology in the paper will be needed. Secondly, the effect of different amount of biochar added to the compost still needs further study. Thirdly, the technology in the paper is more suitable for gutter fermentation process, and the related process parameters worth in-depth study.

**Keywords:** straw; fermentation; biochar; biogas slurry; spraying; resource utilization

Copyright reserved. http://www.cnki.net