

猪发酵床垫料有机质降解特性研究

尹微琴¹, 李建辉¹, 马 晗¹, 郭海宁¹, 李买军¹, 王小治^{1,2*}, 封 克^{1,2}, 顾洪如³

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095; 3.江苏省农业科学院畜牧研究所, 南京 210014)

摘 要:发酵床垫料的选择是发酵床养殖推广的重要环节,垫料原料的选择、管理等直接关系到垫料的有效利用,为此连续采集南京六合发酵床养殖基地4个月的垫料样品,对其中有机质、纤维素、半纤维素、木质素及C/N等进行了测定。结果发现,C/N受垫料组成成分的影响,以稻壳和木屑为原料的垫料中分别添加酒糟(垫料Ⅱ)、菌糠(垫料Ⅲ),其C/N下降要快于以稻壳和木屑为原料的垫料(垫料Ⅰ)。经117 d的使用,垫料Ⅰ的纤维素、半纤维素、木质素的降幅分别为36.12%、25.12%、18.35%,均小于垫料Ⅱ的48.37%、48.16%、31.66%和垫料Ⅲ的49.42%、56.6%、32.69%;垫料Ⅰ、垫料Ⅱ、垫料Ⅲ的纤维素占对应有机质的百分比分别下降1.77%、3.11%、2.19%;垫料Ⅰ的半纤维素占有机质的百分比上升0.66%,而垫料Ⅱ和垫料Ⅲ的半纤维素分别下降2.57%和3.38%;木质素占有机质的百分比分别上升5.36%、5.26%和3.88%。

关键词:猪发酵床;垫料;有机质;降解

中图分类号:X705 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)01-0176-06 doi:10.11654/jaes.2015.01.025

Degradation of Organic Components in Pig Bio-bed Materials

YIN Wei-qin¹, LI Jian-hui¹, MA Han¹, GUO Hai-ning¹, LI Mai-jun¹, WANG Xiao-zhi^{1,2*}, FENG Ke^{1,2}, GU Hong-ru³

(1.College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 3.Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Selection and management of bedding materials are important not only for the popularization of bio-bed pig raising, but also for effective utilization of bedding materials. Organic components of bedding materials, including cellulose, hemicellulose, lignin and C/N, were measured by continuously sampling at different depths of fermentation beds for 4 months in a pig-raising base, Liuhe Nanjing. The results showed that C/N was affected by material composition. The decline rates of C/N in the materials containing rice husk and wood sawdust were faster with adding distillers (Litter II) and fungus chaff (Litter III) than those without distillers or fungus chaff (Litter I). During the experiment of 117 days, cellulose, hemicellulose and lignin in Litter I were decreased by 36.12%, 25.12% and 18.35%, respectively, which were respectively less than those in Litter II (48.37%, 48.16%, 31.66%) and Litter III (49.42%, 56.6%, 32.69%). The percentage of cellulose of total organic components reduced by 1.77%, 3.11%, 2.19%, in Litter I, Litter II and Litter III, respectively. The percentage of hemicellulose in Litter I increased by 0.66%, while that in Litter II and Litter III decreased by 2.57% and 3.38%. However, the percentages of lignin increased by 5.36%, 5.26%, and 3.88% for the Litter I, II, and III.

Keywords: pig bio-bed; bedding materials; organic components; degradation

发酵床养殖是一种将稻壳、木屑、菌糠以及酒糟等按一定比例混合,均匀铺设于畜禽舍底部,再接种

益生菌来分解畜禽粪尿,从而减少畜禽粪尿向环境排放的一种养殖方式^[1-2]。该技术最早出现在日本^[3],发酵床的使用有时采用常年不清理模式,其使用年限与垫料厚度和日常管理有关,日本发酵床使用年限可达10~20 a^[4]。若日常管理不当或使用含高剂量抗生素和重金属的饲料,会显著降低发酵床的使用年限。在每个饲养周期结束时,将表层垫料在舍内或移出猪舍堆积进行一次高温发酵,空闲7~10 d,舍内清洗消毒,同

收稿日期:2014-07-03

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金(CX(12)1001-6);江苏省苏北科技发展规划(BN2013010);江苏省三新工程(SXGC[2013]369);江苏省研究生科研创新计划(KYLX1347)

作者简介:尹微琴(1971—),女,江苏金坛人,高级农艺师,主要从事农业资源与环境方面的研究。E-mail:wqyin@yzu.edu.cn

* 通信作者:王小治 E-mail:xzwang@yzu.edu.cn

时上层补充新垫料,可延长使用年限^[5]。本课题组研究发酵床养殖重金属累积情况时发现,随着垫料使用时间的延长,垫料中重金属含量有明显的增加趋势^[6]。因此,垫料的科学管理及垫料组成对于发酵床垫料的选择,显得尤为重要。现阶段,对堆肥过程中有机质的降解情况已有较多研究,且大多集中在微生物对有机质降解的影响等方面。郭春铭^[7]、韩永亮^[8]等对堆肥过程中加入微生物菌剂,研究微生物菌剂对生猪养殖垫料发酵效果的影响进行了研究;康军等^[9]对污泥好氧堆肥过程中有机质含量的变化做了相关研究;席北斗等^[10]对堆肥中利用微生物分解木质素和纤维素的降解机理进行了探讨。但对发酵床垫料使用过程中有机质的降解情况则鲜有报道。纤维素、半纤维素及木质素是垫料有机质的重要成分,也是难降解物质,研究垫料中纤维素、半纤维素和木质素的降解及其影响因素,对于指导发酵床垫料的选择和管理具有重要意义。

本试验以发酵床养猪为例,研究发酵床养猪过程中不同原料的垫料有机质、纤维素、半纤维素及木质素在4个月使用时间内的降解情况,并对其可能的影响因素进行了分析,旨在为发酵床垫料的选择、后期的资源化利用以及养殖过程中垫料的科学管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于南京六合发酵床试验基地的3栋发酵床中进行,试验用发酵床猪舍已使用2 a,不同栋之间使用不同原料的垫料,每栋分4栏,栏与栏之间用挡板隔开,每栏中垫料的原料相同但配比不同。从正在使用且经前期试验证明原料配比效果最适宜猪生长的一栏选取了三种不同垫料(具体原料及配比见表1)为研究对象,每栏面积50 m²,垫料深度约40 cm,栏内水泥地面积10 m²,每栏养殖生猪15头,生猪养殖周期150 d。

1.2 样品采集

分别于2013年6月8日(0 d)、7月19日(41 d)、8月6日(59 d)、9月3日(87 d)和10月3日(117 d)采集发酵床0~20 cm和20~40 cm层垫料样品,在同

一栏内每种垫料取3个样品作为3个重复,每个样品均采自3个采样点并充分混合均匀。置于室温、通风处,待风干后分两份,用木棒碾碎、球磨仪打磨,分别过30、100目筛,储存备用。

1.3 测定方法及数据处理

总有机碳用重铬酸钾容量法^[11];总氮用半微量凯氏定氮法^[11];纤维素、半纤维素、木质素采用熊素敏等^[12]在王玉万方法的基础上经过改进的方法测定。

采用Excel 2010进行数据分析(以平均值±标准误差表示)。SPSS18.0进行统计分析,Pearson相关分析法分析有机质与纤维素、半纤维素、木质素的相关性,单因素方差分析(One-way ANOVA),Duncan检验法分析显著性差异。采用Origin8.5绘图。

2 结果与分析

2.1 有机质及其组成成分降解情况

由图1可以看出,从试验开始到第41 d时,垫料0~20 cm和20~40 cm层纤维素的降解缓慢,其降解速率都在41~59 d达到最大值,且随时间的进一步延长,不同处理和不同深度垫料纤维素降解表现出较大的差异;在试验周期内尽管垫料Ⅱ的0~20 cm层纤维素含量变化呈一定的波动,但三种垫料的纤维素含量整体均呈下降趋势。如图2所示,在0~20 cm层,垫料Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的半纤维素含量在0~41 d都有缓慢升高的趋势,41~117 d呈下降趋势,但整体呈下降趋势,降解幅度分别为8.86%、41.40%、60.67%;在20~40 cm层,三种垫料的半纤维素含量均呈下降趋势,其降幅分别为41.36%、54.93%、52.53%。

如图3所示,在0~40 cm层,不同垫料的木质素含量在试验期内整体呈下降趋势;垫料Ⅲ的20~40 cm层在87~117 d木质素含量略微上升;垫料Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ经117 d的使用,木质素含量在0~20 cm层降幅分别达11.87%、23.15%、48.67%,20~40 cm层降幅分别为24.83%、40.17%、16.71%。垫料Ⅰ、Ⅱ的20~40 cm层下降幅度明显高于0~20 cm层,而垫料Ⅲ的0~20 cm层下降幅度明显高于20~40 cm层。由图4可以看出,随着垫料的使用,垫料有机质含量都呈下降趋势;经过117 d后,垫料Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的0~20 cm层有机质降幅分别为29.44%、34.21%、40.47%,20~40 cm层的降幅分别为28.51%、42.45%、44.46%;垫料Ⅰ的0~20 cm和20~40 cm层的下降趋势存在差异,但总体降幅差异不大,垫料Ⅱ、Ⅲ的0~40 cm层有机质下降趋势接近,但20~40 cm层降幅均高于0~20 cm。

表1 发酵床垫料基本性质

Table 1 Basic characteristics of pig bio-bed litters

项目	原料	质量比	含水率/%	pH	容重/g·cm ⁻³	C/N
垫料Ⅰ	稻壳/木屑	4/6	53.14	7.73	0.23	34.18
垫料Ⅱ	稻壳/木屑/酒糟	4/3/3	47.04	6.89	0.19	47.51
垫料Ⅲ	稻壳/木屑/菌糠	4/3/3	52.95	6.72	0.22	40.34

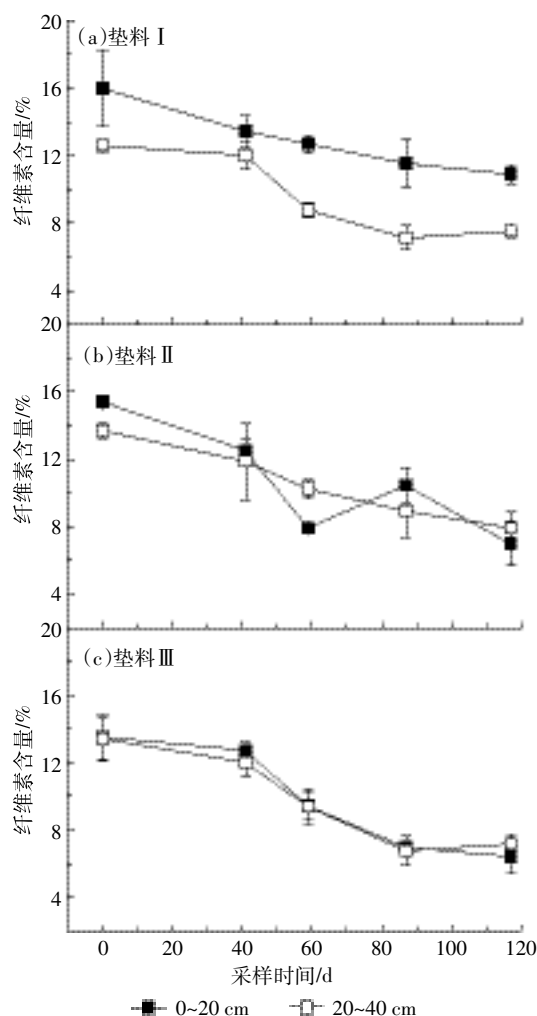


图1 纤维素随时间的变化趋势

Figure 1 Changes of cellulose content over time

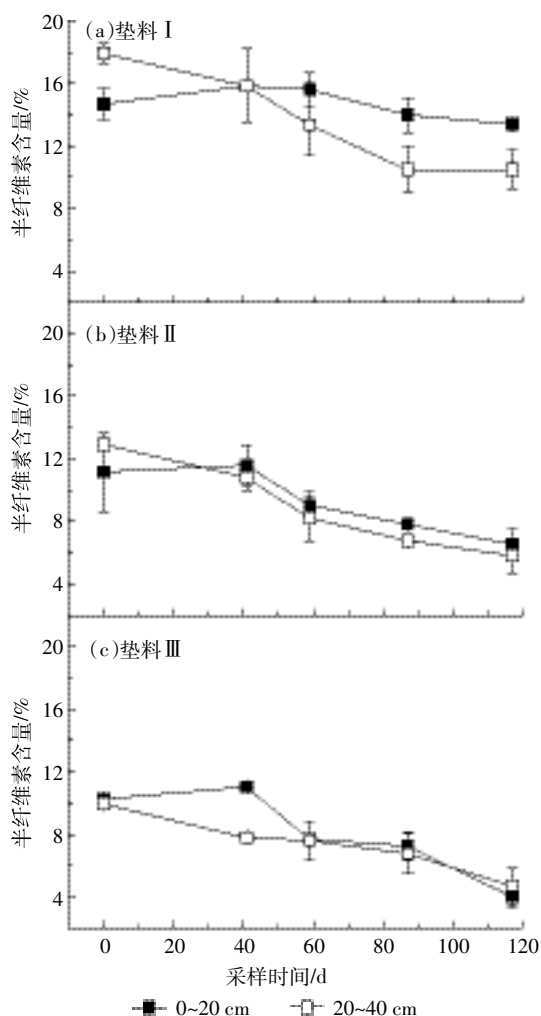


图2 半纤维素随时间的变化趋势

Figure 2 Changes of hemicellulose content over time

2.2 相关性分析

由表2可见,垫料I有机质与纤维素、半纤维素在0~20 cm层的相关性不大,与木质素的相关性则达到了极显著水平($P<0.01$);在20~40 cm层,有机质与纤维素和半纤维素的相关性达到显著水平($P<0.05$),

表2 垫料有机质与纤维素、半纤维素、木质素相关性分析

Table 2 Correlation of organic matter with cellulose, hemicellulose, and lignin in bio-bed litters

项目	垫料 I		垫料 II		垫料 III	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
纤维素	0.855	0.896*	0.904*	0.981**	0.930*	0.920*
半纤维素	0.766	0.954*	0.939*	0.969**	0.878	0.908*
木质素	0.961**	0.858	0.934*	0.998**	0.918*	0.947*

注:*表示相关性在0.05水平显著;**表示相关性在0.01水平显著。 $n=5$ 。

Note:* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. $n=5$.

与木质素的相关性则不显著。垫料II在0~20 cm层的有机质与纤维素、半纤维素和木质素都达到了显著相关水平($P<0.05$);在20~40 cm层均达到了极显著水平($P<0.01$)。垫料III在0~20 cm层的有机质与纤维素和木质素达到了显著相关($P<0.05$),与半纤维素的相关性则不显著;在20~40 cm层,有机质与纤维素、半纤维素和木质素都达到了显著相关水平($P<0.05$)。

2.3 垫料碳氮比变化情况

垫料碳氮比通过影响微生物的活动来反映垫料酶活性的大小,微生物生长适宜的C/N约为25^[13]。由表3可知,随着时间的推移,垫料的C/N呈下降趋势,部分批次间差异显著($P<0.05$)。垫料I在0~20 cm层,87 d之前C/N都保持在25以上,而20~40 cm层中C/N降低至25时大致需要117 d,尽管垫料I的20~40 cm层中C/N在59 d前要略高于原始垫料,但与原始C/N之间不存在显著性差异。垫料II和垫料III

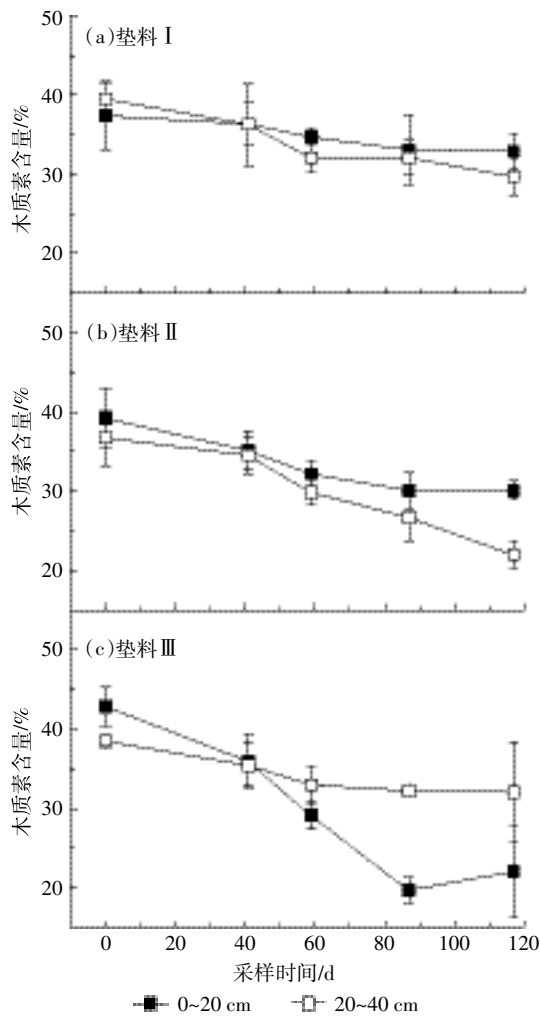


图 3 木质素随时间的变化趋势

Figure 3 Changes of lignin content over time

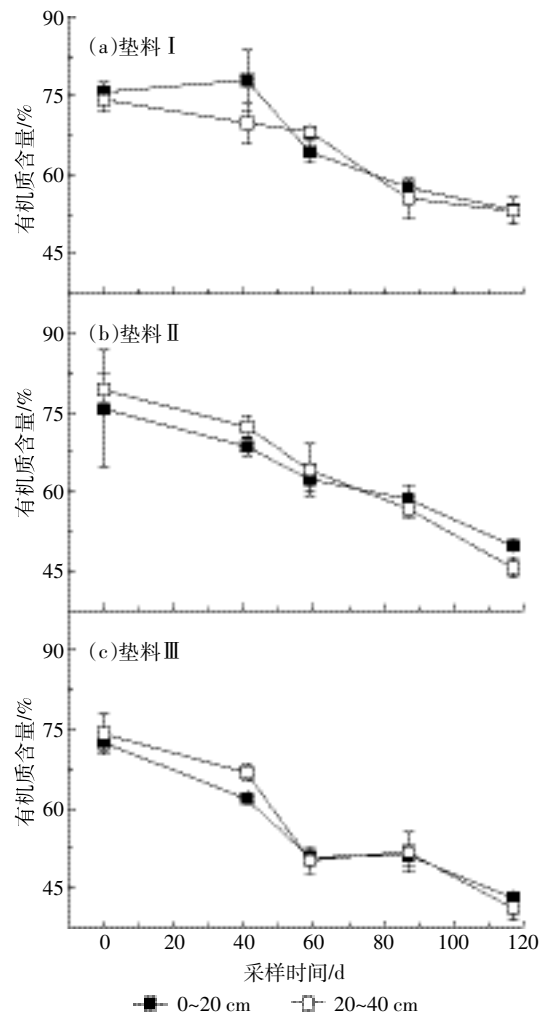


图 4 有机质随时间的变化趋势

Figure 4 Changes of organic matter content over

表 3 垫料碳氮比

Table 3 Ratios of C/N in bio-bed litters

时间/d	垫料 I		垫料 II		垫料 III	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
0	29.97±6.09ab	37.73±2.50ab	45.37±4.83a	35.45±2.46a	36.46±2.53a	37.15±1.99a
41	34.81±4.18a	35.11±4.01ab	28.74±3.36b	28.04±2.20ab	29.83±1.77b	29.60±2.76ab
59	33.61±3.81a	40.18±12.19a	21.54±1.68bc	21.33±2.74bc	22.81±2.30c	26.58±7.14ab
87	24.53±0.73ab	32.46±6.39ab	19.29±0.85c	25.70±6.03ab	17.85±0.57c	19.31±2.04b
117	18.29±0.85b	23.15±0.70b	14.85±1.22c	14.53±0.28c	16.71±1.86c	16.95±1.97b

注: 同列不同小写字母表示达到 0.05 显著水平。

Note: Data in the same row followed by different small letters are significantly at 0.05 level.

的 0~20 cm 层在 59 d 之前 C/N 就已经降到 25 以下; 在 20~40 cm 层, 垫料 II 的 C/N 用了 87 d 降至 25, 而垫料 III 在 59 d 时 C/N 也接近 25。此外可以发现, 在不同层次, 垫料 II 和垫料 III 的 C/N 降至 25 所用的时间均要少于垫料 I。

3 讨论

发酵床垫料含有大量的纤维素、半纤维素和木质素, 其中木质素分子结构复杂而不规则, 是目前公认的难降解芳香族化合物之一^[14]。在细胞壁中, 由于木

质素保护着纤维素,纤维素的降解受到限制^[15-16]。秦莉等^[7-8,17]研究发现,添加微生物菌剂能明显促进生猪养殖垫料中纤维素、半纤维素、木质素的降解。本研究中,0~40 cm 层垫料Ⅱ、Ⅲ纤维素降幅达 48.38% 和 49.42%,明显高于垫料Ⅰ的 36.12%。因为垫料Ⅱ、Ⅲ比垫料Ⅰ增添了酒糟、菌糠等原料,这些原料中含有大量微生物^[18-19],加快了垫料纤维素、半纤维素及木质素的降解,与前人研究结论相符^[7-8,17]。由于 pH 值也是影响微生物活动的重要指标,由表 1 比较发现垫料Ⅰ的 pH 值高于垫料Ⅱ、Ⅲ,不太利于微生物活动,可能导致垫料降解受阻。不同垫料的含水率、容重间差异均不大,在本试验中垫料水分不是影响其降解的主要因素,不过仍要注意垫料中局部水分含量过高导致发酵终止的现象。垫料Ⅱ、Ⅲ有机物质的降解速率明显大于垫料Ⅰ,也反映出添加酒糟、菌糠对垫料及猪粪尿分解的促进作用。由图 1(a)还发现,试验初期垫料Ⅰ中不同层次之间纤维素含量存在显著差异,笔者认为这和垫料中没有添加酒糟、菌糠等能促进产生微生物的辅料有关。由于 0~20 cm 和 20~40 cm 垫料层通气情况存在差异,且垫料中微生物活性较弱,使得不同层次降解情况存在差异,而在降解过程中活动旺盛的微生物发挥的作用,减少了垫料Ⅱ、Ⅲ间差异的发生。

垫料中适宜微生物生长的 C/N 约为 25,当 C/N 大于等于 25 时微生物对碳源的利用率高,低于 25 时不利于微生物对有机物质的降解^[13]。随使用时间的推移,垫料 C/N 呈下降趋势,三种不同垫料中都是 0~20 cm 的表层垫料先降低至微生物活动的最适宜 C/N 值。这可能是因为木屑、稻壳等原料属于多孔结构,导致表层垫料进行好氧发酵,下层垫料厌氧发酵,而好氧发酵对碳源的利用率要高于厌氧发酵。另外不管在哪个层次,垫料Ⅱ和垫料Ⅲ的 C/N 的降低速率都快于垫料Ⅰ,同样是由于酒糟、菌糠中含有大量微生物,加快了碳源的消耗,导致 C/N 降低加快。有学者研究指出,垫料中纤维素酶、木聚糖酶、过氧化物酶、多酚氧化酶活性随垫料使用时间的延长而显著增加^[20],而纤维素、半纤维素、木质素的分解与酶活性关系密切,本研究也表明垫料中纤维素酶活性随着垫料使用时间的延长而增大^[21]。本研究结果显示垫料中纤维素、半纤维素、木质素等有机物质的降解速率在 41~59 d 时达到最高,且绝大多数达到显著性差异。这可能是在酶活性与 C/N 的双重作用下导致:一方面垫料酶活性的升高导致纤维素、半纤维素、木质素的降解速率加

快,这时尽管 C/N 不断下降,但仍能满足微生物的正常活动;另一方面,纤维素、半纤维素、木质素作为微生物的碳源,当 C/N 下降到一定程度(25 以下),微生物活动受阻,使得垫料中有机物质降解速率随之下降。另外由于垫料的降解一直在进行,在试验的后期已经发现垫料层部分板结,发酵受阻的现象也越来越严重,对此笔者认为,应当及时补充新鲜垫料加以混合、堆翻,以满足发酵所需条件,防止“死床”发生,提高垫料的利用效率。

对有机质与纤维素、半纤维素和木质素的相关性分析发现,有机质与纤维素、半纤维素和木质素的降解趋势呈显著或极显著的正相关。对纤维素、半纤维素和木质素占有有机质百分比的研究发现,除垫料Ⅰ半纤维素略微升高外,纤维素、半纤维素占有有机质的百分比均随时间的推移逐渐下降,而木质素占有有机质的百分比上升。这可能是因为木质素较纤维素和半纤维素以及垫料中其他有机成分更难被降解所致。纤维素、半纤维素及木质素是垫料有机质的主要成分,最高可达垫料有机质的 90% 以上,纤维素、半纤维素和木质素的分解可以直观反映垫料有机物质的分解情况。

发酵床垫料的选取原则是吸水性强、在阳光下易干燥以及来源经济。发酵床垫料多选用惰性、清新干燥、无霉变的垫料,最好选用锯末、稻壳^[22]。对本试验所选三种垫料的对比发现,在 0~40 cm 垫料层,垫料Ⅰ有机质、纤维素、半纤维素及木质素在 4 个月的使用过程中降幅分别为 28.97%、36.12%、25.12% 和 18.35%;垫料Ⅱ的降幅分别为 38.32%、48.37%、48.16% 和 31.66%;垫料Ⅲ的降幅分别为 42.47%、49.42%、56.6% 和 32.69%。可以看出,如果需要垫料的使用周期长,垫料Ⅰ的原料优于垫料Ⅱ、Ⅲ;而若考虑在养殖一批生猪后将垫料清出以进行资源化利用,垫料Ⅱ、Ⅲ更为合适,其充分利用了养殖业的废弃资源,还有促进猪粪尿分解的优点。

4 结论

使用 117 d 的不同垫料 C/N 和有机质、纤维素、半纤维素、木质素含量变化的试验结果表明:

(1) C/N 受垫料组成成分的影响,以稻壳和木屑为原料的垫料中分别添加酒糟、菌糠,其 C/N 下降至微生物活动最旺盛的值(C/N=25)均要快于只含稻壳和木屑的垫料。

(2) 以稻壳和木屑为原料的垫料纤维素、半纤维素、木质素含量的下降幅度都小于添加酒糟、菌糠的

垫料。

(3)三种不同垫料的纤维素占有机质的百分比均呈下降趋势,而木质素所占的百分比都升高;在由稻壳和木屑组成的垫料中,其半纤维素所占的比例略微升高,而添加酒糟、菌糠的垫料的半纤维素在有机质中的比例下降。

参考文献:

- [1] 王 华, 刘志刚, 唐新桥, 等. 发酵床式生态养猪技术[J]. 湖南畜牧兽医, 2009(1): 21-24.
WANG Hua, LIU Zhi-gang, TANG Xin-qiao, et al. The eco-method of pig-on-litter system[J]. *Hunan Journal of Animal Science & Veterinary Medicine*, 2009(1): 21-24.
- [2] Tam N F Y, Vrijmoed L P. Effects of the inoculums size of commercial bacterial product and the age of sawdust bedding on pig waste decomposition in a pig-on-litter system[J]. *Waste Management*, 1993, 11(2): 107-115.
- [3] Haug R T. The practical handbook of compost engineering[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- [4] 李 娜. 发酵床不同垫料筛选及其堆肥化效应研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
LI Na. Study on the selection of different litter ratio in deep-litter system and its effects on aging litter composting[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.
- [5] 颜培实. 发酵床养猪的原理、误区与关键技术[J]. 农村养殖技术, 2009(14): 11-12.
YAN Pei-shi. The Principle, misunderstanding and key technologies of pig fermentation bed[J]. *Rural of Farming Techniques*, 2009(14): 11-12.
- [6] 李买军, 马 晗, 郭海宁, 等. 发酵床养猪对土壤重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 520-525.
LI Mai-jun, MA Han, GUO Hai-ning, et al. Effect of pig bio-bed breeding on heavy metal content in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 520-525.
- [7] 郭春铭, 荣湘民, 韩永亮, 等. 微生物菌剂对生猪养殖垫料堆肥腐熟效果的研究[J]. 湖南农业科学, 2011(7): 52-56, 60.
GUO Chun-ming, RONG Xiang-min, HAN Yong-liang, et al. Influences of different microbial agents on decomposition effect of pig bedding compost[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011(7): 52-56, 60.
- [8] 韩永亮, 荣湘民, 郭春铭, 等. 微生物菌剂对生猪养殖垫料发酵效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(15): 8957-8960, 9012.
HAN Yong-liang, RONG Xiang-min, GUO Chun-ming, et al. Effects of microbial agents on decomposing of pig breeding litter[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(15): 8957-8960, 9012.
- [9] 康 军, 张增强, 贾 程, 等. 污泥好氧堆肥过程中有机质含量的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)2009, 37(6): 118-124.
KANG Jun, ZHANG Zeng-qiang, JIA Cheng, et al. Changes of organic matter content during aerobic co-composting of sewage sludge with straw[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)*, 2009, 37(6): 118-124.
- [10] 席北斗, 刘鸿亮, 白庆中, 等. 堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状[J]. 环境污染治理技术与设备 2002, 3(3): 19-23.
XI Bei-dou, LIU Hong-liang, BAI Qing-zhong, et al. Study on current status of lignin and cellulose biodegradation in composting process[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(3): 19-23.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] 熊素敏, 左秀凤, 朱永义, 等. 稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J]. 粮食与饲料工业, 2005(8): 40-41.
XIONG Su-min, ZUO Xiu-feng, ZHU Yong-yi, et al. Determination of cellulose, hemi-cellulose and lignin in rice hull[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2005(8): 40-41.
- [13] 张 蓓. 碳氮比及腐熟菌剂对玉米秸秆发酵的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
ZHANG Bei. Effects of carbon nitrogen ratio and microbial inoculants on corn straw fermentation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012.
- [14] Jostrom S E. Wood chemistry, fundamentals and applications [M]. 2nd ed. New York/London: Academic Press, 1993.
- [15] 李国学, 张福锁. 固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.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid waste composting and organic fertilizer production[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [16] 高 扬, 王双飞, 陈嘉翔, 等. 木质素的生物降解及酶的作用[J]. 纸和造纸, 1996, 3(2): 51.
GAO Yang, WANG Shuang-fei, CHEN Jia-xiang, et al. Biodegradation of lignin and enzymes[J]. *Paper and Paper Making*, 1996, 3(2): 51.
- [17] 秦 莉, 高茹英, 李国学, 等. 外源复合菌系对堆肥纤维素和金霉素降解效果的研究[J]. 农业环境科学学报 2009, 28(4): 820-823.
QIN Li, GAO Ru-ying, LI Guo-xue, et al. Decomposition effect of additive of composite microbial system on cellulose and chlortetracycline in composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 820-823.
- [18] 郭 霞. 浓香型白酒酒糟微生物分离及发酵试验[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2005, 22(1): 50-52.
GUO Xia. Isolation of microbes and fermentation from distiller's grains of Luzhou-flavor liquor[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 22(1): 50-52.
- [19] 周 巍, 盛宣宜, 彭霞薇, 等. 菌糠的综合利用研究进展[J]. 生物技术, 2011, 21(2): 94-97.
ZHOU Wei, SHENG Xuan-yi, PENG Xia-wei, et al. Research progresses and utilization of spent mushroom substrates[J]. *Biotechnology*, 2011, 21(2): 94-97.
- [20] 周 颖. 秸秆与牛粪蚯蚓堆制处理时纤维素、半纤维素和木质素降解率及相关酶活性变化的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
ZHOU Ying. Study on the rate of cellulose, hemicellulose and lignin decomposition and enzyme activities change in the mixtures of cow manure and crop stalk during vermicomposting [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [21] 李买军, 马 晗, 郭海宁, 等. 养猪场发酵床垫料及下层土壤中酶活性变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 777-782.
LI Mai-jun, MA Han, GUO Hai-ning, et al. Enzyme activities in bedding and soil layers of pig bio-beds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 777-782.
- [22] Oliveira P A, Souloumiac D, Robin P, et al. Heat production by fattening pigs in deep-litter or conventional slatted floor systems[J]. *Annales de Zoo Technie*, 1999, 48: 117-129.