

# 蘑菇培养土生物炭堆肥化利用及其对水稻生长的影响

张翔<sup>1</sup>, 张耿峻<sup>1</sup>, 孙倩因<sup>2</sup>, 彭彦彬<sup>2</sup>, 王兴栋<sup>1</sup>, 李蒙<sup>1</sup>, 汪印<sup>1\*</sup>

(1.中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021; 2.华南理工大学环境与能源学院, 广州 510641)

**摘要:**为尝试将蘑菇培养土制成生物炭来改善生物肥料的品质, 重点考察了添加蘑菇培养土生物炭对猪粪堆肥的物化特性影响。结果表明:在 500 °C 下热解制备的蘑菇培养土生物炭分别以 0%、5%、10%、15% (W/W) 的比例与猪粪混合堆肥后, 显著降低了堆肥的电导率、初始含水率和有机物的损失量;堆肥中 Ca 与 K 的含量与添加生物炭没有太大的相关性, N 的含量与生物炭添加比例具有很好的正相关性, P 与 Mg 的改变量则随着生物炭添加比例的增加呈现下降趋势。水稻栽培实验结果表明施用生物炭能有效促进水稻生长, 稻穗(干重)最多可增产 49%。

**关键词:**蘑菇培养土;生物炭;堆肥;物化特性;水稻栽培

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)10-2036-06 doi:10.11654/jaes.2014.10.022

## Influence of Biochar from Spent Mushroom Substrate on Properties of Pig Manure Compost and Rice Growth

ZHANG Xiang<sup>1</sup>, ZHANG Geng-ling<sup>1</sup>, SUN Qian-nan<sup>2</sup>, PENG Yan-bin<sup>2</sup>, WANG Xing-dong<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, WANG Yin<sup>1\*</sup>

(1.Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2.College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Spent mushroom substrate (SMS), a bulky waste byproduct of commercial mushroom industry, has caused environmental pollution. In this work, biochar derived from SMS was added to pig manure at a rate of 0, 5%, 10% and 15% (W/W) to investigate its effects on the physico-chemical properties of pig manure during composting and rice growth. Adding SMS-derived biochar significantly reduced electrical conductivity, initial moisture content and organic matter loss of the compost. The biochar additions significantly increased the N concentrations in the compost, but had no obvious effects on the concentrations of Ca and K. The concentrations of P and Mg in the fertilizer increased as compared to the control, but the increments decreased with increasing amount of the biochar. Applying SMS-derived biochar effectively promoted rice growth and increased the grain yield by 49% at 5% biochar.

**Keywords:** spent mushroom substrate; biochar; composting; physicochemical property; rice

蘑菇培养土是生产蘑菇过程中产生的一种生物质废弃物,由木屑、麸皮、玉米芯等组成,数量巨大,目前绝大多数露天堆弃,既对环境造成污染,也是资源的浪费。蘑菇培养土具有许多经济用途上的潜力,例如,部分作为土壤生物修复剂<sup>[1]</sup>、生物燃料<sup>[2-4]</sup>和生物肥料<sup>[5-7]</sup>得到了资源再利用。但是,尚未发现关于蘑菇培养土制备成生物炭再利用的报道。

所谓生物炭,是指有机固体废弃物在干馏或有氧

热解条件下制备而成的多孔炭。近年的研究证明,生物炭在减轻全球变暖与作为土壤改良剂提高土壤质量和作物产量方面具有很好的作用<sup>[8]</sup>。根据室内实验和田间观察,生物炭相对于土壤中其他有机物质更加稳定<sup>[9]</sup>。生物炭还具有许多长期的正面效应,包括增加吸附能力、减少养分流失、增加土壤有机碳和微生物群落大小等<sup>[10]</sup>,从而提升土壤肥沃性<sup>[11-14]</sup>,但关于生物炭对堆肥质量影响的研究很少。堆肥主要是在好氧条件下通过大量微生物将有机物生物转化的过程<sup>[15]</sup>。最近的研究表明,生物炭作为堆肥添加剂能减少氮和其他营养元素从堆肥混合物中损失<sup>[17]</sup>,增加有机物质的腐殖程度来增强堆肥质量<sup>[16]</sup>。Jindo 等<sup>[15]</sup>曾研究将硬木制备的生物炭添加到堆肥混合物中的效果,结果表明生物炭能引起微生物群落的改变。从这些结

收稿日期:2014-03-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51176197);中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-16);厦门市科技创新平台项目(3502Z2013018)

作者简介:张翔(1989—),男,硕士研究生,研究方向为有机废弃物资源化利用。E-mail:xiangzhang@iue.ac.cn

\* 通信作者:汪印 E-mail:yinwang@iue.ac.cn

果来看,生物炭在堆肥过程中对堆肥物化特性的影响还需深入探讨,比如堆肥温度、电导率、有机质降解等。因此,本研究以蘑菇培养土为原料,将其制备成生物炭添加到猪粪中进行堆肥,较全面考察了堆肥过程中蘑菇培养土生物炭对堆肥温度、含水率与电导率、有机质降解、营养元素变化方面的影响。并以水稻为实验作物,探究添加生物炭肥料后对水稻产量的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 基质和生物炭制备

堆肥猪粪原料取自福建省厦门市同安郊区的养猪场。蘑菇培养土原料来自于厦门市如意情集团有限公司。生物炭制备过程如下:将干燥的蘑菇培养土置于管式电炉中的石英管进行热解,热解过程中通入纯氮以确保为无氧条件。以  $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的恒定升温速率加热到  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,维持 5 h 后在氮气流中将温度降至室温。热解得到的生物炭保存于真空干燥器中,进行后续的物化特性分析。堆肥中添加的水稻秸秆在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  下烘干 24 h 直至含水率小于 10%,并将其剪成长度约为 8 cm 的小片段。

堆肥过程在 4 个 100 L 的高密度聚乙烯反应器中进行,反应器下方配置一个阀门,便于渗滤液和浓缩物流出。生物炭以 5%(0.82 kg)、10%(1.64 kg)和 15%(2.46 kg) 3 种不同的质量比加入到堆肥样品中(分别以 5%-Biochar、10%-Biochar、15%-Biochar 表示)。另外,设置一组不添加生物炭的实验作为对照组。每个反应器中猪粪添加量为 15 kg。植种添加量为 1.10 kg,植种选自上一批堆肥成品。反应器中加入 2%(0.30 kg)的秸秆作为膨松剂,堆肥过程持续约 42 d。

### 1.2 堆肥数据采集与分析

堆肥过程中每日以温度探针在堆肥样品 10 cm 以下(平均堆肥厚度约 30 cm)随机测定 4 个点来监测堆肥温度。在堆肥开始时和之后的第 7、14、21、28、42 d,随机从每个反应器中采取 6 个样品。将 20 g 样品在  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  下烘干 24 h 测定含水率,电导率和 pH 值分别通过 pH 计 UB-7 (Ultra Basic, US) 和电导计 Cond 3110 (Tetracon 325, Germany) 对液态提取物进行测定。液态提取物以样品重量与去离子水体积比按 1:5 (W/V) 配制,  $240\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  下振动 60 min,静置 30 min 后取上层清液。TC 和 TN 使用元素分析仪 (VarioMax CNS, Germany) 通过干式燃烧法测得。有机质含量是测定置于  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  下灼烧 4 h 后的样品损失量。有

机质损失量(K)可根据以下公式计算<sup>[17]</sup>:

$$K = \frac{[\text{OMb}(\%) - \text{OMe}(\%)] \times 100}{\text{OMb}(\%) \times [100 - \text{OMe}(\%)]}$$

式中:OMb 指起始有机质含量;OMe 指结束时有机质含量。

常量元素包括 Ca、Na、K、P、Mg 等,通过 ICP-OES (Perkin-Elmer Optima 7000 DV, Downers Grove, IL) 测定。为了能够满足 ICP-OES 对样品的要求,对约 0.2 g 的样品在石墨加热系统上进行  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$  消解,从而得到均一的液态样本。

### 1.3 生物炭肥料对水稻生长的影响实验

使用酸性砂质壤土进行盆栽试验,采用直径 30 cm、高 40 cm 的高密度聚乙烯材料圆筒,盆栽地点为培育温室。实验用土基本性质:pH 4.93,有机质含量 ( $7.74 \pm 0.10$ )%,电导率 ( $41.07 \pm 0.23$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , TOC ( $0.310\text{ }3 \pm 0.002\text{ }6$ )%, TC ( $0.325\text{ }1 \pm 0.003\text{ }1$ )%。盆栽设不添加肥料、添加 5%一般肥料、添加 5%生物炭肥料 3 个条件,每个条件进行 3 重复,共计 9 个处理,每个盆中的肥料与土壤共 4.0 kg。试验期间每周测定水稻高度,并在收割时测定稻穗干重、叶子干重、茎干重与根干重。

### 1.4 统计分析

实验数据用 Origin 8.0 软件作图,SPSS 19.0 进行统计分析,Turkey ( $P < 0.05$ ) 法进行统计检测。

## 2 结果与分析

### 2.1 原料特性分析

表 1 是猪粪、生物炭和秸秆的化学特性分析结果。可以看出,猪粪和秸秆的 pH 值为中性,而生物炭为碱性,添加生物炭的有机肥应有改良酸化土壤的功能。猪粪和生物炭的电导率明显比秸秆高,猪粪和生物炭具有相似的碳氮比,秸秆的碳氮比高于前两者。猪粪、生物炭和秸秆都具有很高的有机质含量。

### 2.2 堆肥温度

堆肥温度是用于监测堆肥过程的一个重要参数。图 1 为堆肥过程中的温度随时间变化曲线。在堆肥后的 1~3 d,不同条件下的堆肥温度都经历了一个快速

表 1 实验原料的化学特性

Table 1 Some chemical properties of materials used

| 原料  | pH    | 含水率/% | 电导率/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ | C/N   | 有机质/% |
|-----|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|
| 猪粪  | 6.73  | 74.50 | 3.35                                | 18.72 | 73.13 |
| 生物炭 | 10.90 | 1.65  | 3.70                                | 18.69 | 70.64 |
| 秸秆  | 7.29  | 9.09  | 0.01                                | 43.04 | 86.71 |

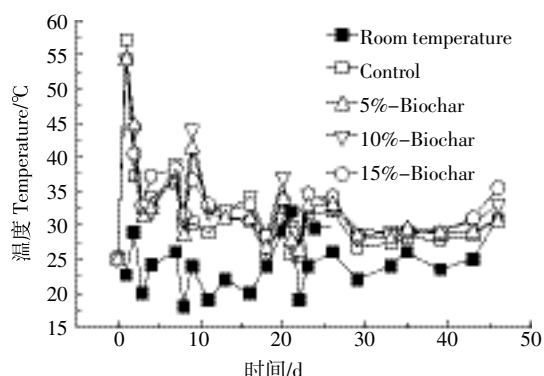


图1 堆肥过程中温度变化曲线

Figure 1 Change of temperature over time during composting

上升然后快速下降的过程。很明显可以看出,所有实验组的温度都达到了 55 °C 的高温,然而这个最高温度只保持了几个小时。还可以看出,添加生物炭实验组的堆肥温度整体上高于控制组。在堆肥达到 28 d 后,所有反应器的温度都稳定在 30 °C 左右。

### 2.3 含水率和电导率的改变

图 2 是所有堆肥混合物的含水率随时间的变化曲线。由于不同实验组生物炭添加量不同导致物料初始含水率(51.45%~52.39%)不同,但差别很小。可以看出,各个反应器中混合物的含水率持续降低并在 28 d 后趋于稳定。所有添加生物炭堆肥的初始含水率明显低于没有添加生物炭堆肥的含水率(59.88%),其中 10%-Biochar 实验组的含水率下降最快,最先趋于稳定状态。还可以看出,添加生物炭实验组的最终含水率(38.78%~39.59%)低于对照组(46.19%)。

图 3 所示为堆肥前后和种植土壤电导率(EC)的变化趋势。本研究所有实验组的 EC 在堆肥前后都呈现增加的趋势。在堆肥过程后期,对照组的堆肥产生较高的 EC 值( $7.65 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ),而其他组的 EC 相对较低( $5.60 \sim 5.85 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )。将肥料与土壤按 5:95 的质量

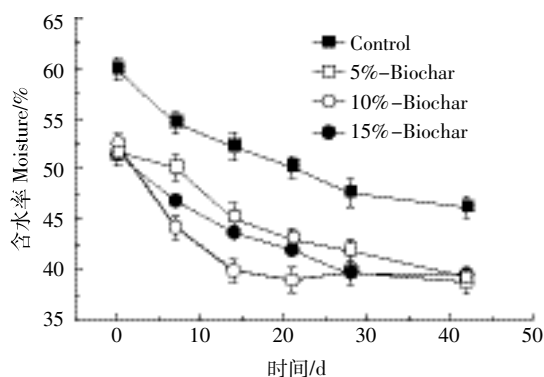


图2 堆肥过程中含水率随时间的变化曲线

Figure 2 Change of moisture content over time during composting

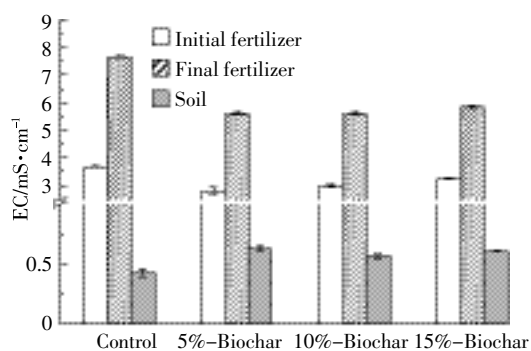


图3 堆肥前后和种植土壤的电导率

Figure 3 Electrical conductivity of manure before and after composting and soil

比例混合均匀后的电导率显示,对照组最低( $0.43 \pm 0.03 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ),添加生物炭组均大于  $0.50 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,其中最大为 5%-Biochar 实验组( $0.64 \pm 0.02 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )。

### 2.4 有机物质的降解

图 4 为各反应器中有机质的损失量(K)。在经过 42 d 的堆肥后,有机质损失量最大值(31.99%)出现在没有添加生物炭的对照组,最小值(19.32%)为添加了 15%生物炭的实验组。这个结果与添加生物炭堆肥的低电导率吻合。随着生物炭比例的增加,有机质损失量逐渐减小,生物炭的添加减少了堆肥过程中有机物的分解。

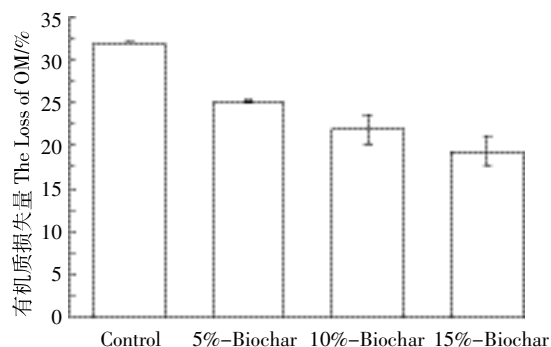


图4 不同肥料在堆肥终止时的有机质损失量

Figure 4 Loss of organic matter in manure at the end of composting

### 2.5 堆肥前后常量营养元素的含量变化

表 2 为堆肥前后与添加不同比例生物炭的常量营养元素含量及改变量的分析。比较堆肥前后 5 种元素的含量变化可知,堆肥后元素浓度均有所提高,唯独添加 15%生物炭的实验组中大部分元素浓度持平,K、Mg 甚至有下降的趋势(K 和 Mg 分别降低了 15.50% 和 8.93%)。原因可能是添加过量的生物炭使堆肥中菌群的生长受到抑制,相对减弱了对有机物质的分解及堆肥体积的下降,导致元素浓度没有提高。观察对

表 2 堆肥中常量营养元素的含量及改变量  
Table 2 Concentrations and changes of macronutrients in  
composting materials

| 元素     |    | 堆肥前/mg·g <sup>-1</sup> | 堆肥后/mg·g <sup>-1</sup> | 改变量/%  |
|--------|----|------------------------|------------------------|--------|
| 对照组    | Ca | 23.90±6.37             | 41.52±2.09             | 73.72  |
|        | N  | 20.44±0.29             | 27.84±0.38             | 36.20  |
|        | K  | 42.68±9.34             | 75.86±1.00             | 77.74  |
|        | P  | 7.61±0.61              | 10.81±1.21             | 42.05  |
|        | Mg | 4.38±0.76              | 7.82±0.23              | 78.54  |
| 5%生物炭  | Ca | 26.97±5.87             | 33.33±0.65             | 23.60  |
|        | N  | 21.92±0.59             | 30.89±1.38             | 40.92  |
|        | K  | 26.61±12.08            | 54.95±7.12             | 106.50 |
|        | P  | 9.22±1.01              | 14.33±0.38             | 55.42  |
|        | Mg | 6.15±1.65              | 9.26±0.44              | 9.26   |
| 10%生物炭 | Ca | 22.37±2.04             | 35.78±0.97             | 59.95  |
|        | N  | 24.25±0.31             | 34.18±0.05             | 40.94  |
|        | K  | 34.92±3.71             | 44.65±4.06             | 27.86  |
|        | P  | 12.93±0.94             | 17.96±0.78             | 38.90  |
|        | Mg | 7.62±0.99              | 10.44±0.36             | 37.00  |
| 15%生物炭 | Ca | 33.37±5.09             | 33.26±2.08             | -0.33  |
|        | N  | 24.49±0.51             | 35.08±0.10             | 43.24  |
|        | K  | 75.64±9.38             | 63.92±2.88             | -15.50 |
|        | P  | 18.32±1.91             | 20.78±0.86             | 13.43  |
|        | Mg | 13.44±2.07             | 12.24±0.13             | -8.93  |

照组与添加生物炭的样品看出,Ca 与K 的含量与添加生物炭没有太大的相关性( $P>0.05$ )。生物炭的添加显著增大了 N 元素的含量 ( $P<0.05$ ), 最大改变量为 15%的添加处理。P 元素在 5%添加量时改变量最大, 且 P 元素和 Mg 元素的改变量随生物炭添加量增加而呈现下降的趋势。

## 2.6 添加生物炭肥料对水稻生长的影响

为验证所制备的生物炭基肥料的肥效,进行了不同条件的水稻栽培实验。图 5 显示不添加肥料、添加

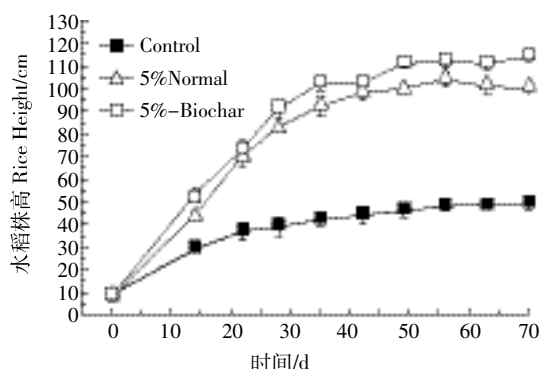


图 5 不同肥料条件下的水稻株高变化

Figure 5 Height of rice plant under different treatment conditions

5%一般肥料与添加 5%生物炭肥料的水稻株高变化。可以看出,添加一般肥料与生物炭肥料皆能有效地促进水稻株高的生长。采收时添加生物炭肥料的水稻株高比添加一般肥料的水稻株高增加约 14%。

由表 3 可以看出,添加一般肥料与生物炭肥料能大幅提升各项生物质的干重,其中以稻穗干重提升最多。使用生物炭肥料处理的又比一般肥料处理的增加干重 19%~49%, 说明施用生物炭肥料更有利于水稻的增产。添加生物炭后水稻株高和生物质干重均高于对照组的实验结果也与上述堆肥过程中添加生物炭能将肥料电导率调节到合适范围,减少有机质的损失等结果相吻合。

表 3 收割时的稻穗、叶子、茎、根干重(g)  
Table 3 Dry weights of grains, leaves, stems and roots  
at harvesting( g)

| 项目      | 不添加肥料    | 添加 5%一般肥料 | 添加 5%生物炭肥料 |
|---------|----------|-----------|------------|
| 稻穗干重(g) | 0.3±0.1a | 14.4±3.3b | 21.5±2.1c  |
| 叶子干重(g) | 0.5±0.2a | 4.8±0.6b  | 6.6±0.6c   |
| 茎干重(g)  | 0.4±0.2a | 6.4±0.7b  | 7.6±0.8b   |
| 根干重(g)  | 0.3±0.1a | 2.0±0.5b  | 2.8±0.3b   |

注:同行不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters within a row represent significant difference between treatments( $P<0.05$ ).

## 3 讨论

### 3.1 温度

堆肥温度是判断堆肥是否达到无害化要求的重要指标之一,反映了堆肥系统中微生物代谢活动产热累积与散热平衡。一般认为,最适宜的堆肥温度应在 55~60 ℃<sup>[18]</sup>,各实验组均达到了这个温度,但保持时间较短。添加生物炭实验组的堆肥温度整体上高于对照组,反应了生物炭对于堆肥物化性质具有积极影响,可能是由于其增加表面积或具有很强的持水能力<sup>[19]</sup>。这种环境非常适合微生物活动<sup>[20]</sup>,快速剧烈的微生物活动导致堆肥速度加快,停留时间缩短,同时一定程度上的巴式灭菌法可以杀死多种病原体<sup>[21]</sup>。

### 3.2 含水率和电导率

水分的存在不仅可以溶解堆肥物料中营养物质等以利于微生物的代谢,而且水分蒸发散热对堆体温度具有一定的调节作用。堆肥中所有实验组含水率均持续降低并最后趋于稳定,堆肥过程中水分减少的主要机理是:由于生物热的产生,水分蒸发引起热量在强制和自然曝气过程中的转移,逐渐干燥堆料。堆肥

过程中水分的持续减少同时也表明有机质的分解<sup>[22]</sup>。生物炭具有丰富的孔隙结构、良好的持水能力、可改善基质 pH 环境等特性,能为微生物提供合适的代谢环境,促进微生物的代谢。堆肥过程中水分的减少一方面是由于微生物代谢吸收转化,另一方面是由于微生物蒸发,所以在堆肥过程中添加生物炭具有积极的影响,初始阶段能调节基质含水率,堆肥过程中促进微生物代谢活动加快,含水率降低。

电导率是反映肥料肥性的重要基础指标,可以反映肥料的品质及其物理性质等丰富信息<sup>[23]</sup>。过高的电导率不利于植物的生长,例如降低植物生长速度与产量<sup>[24]</sup>、发生烧苗现象等,电导率过低则容易造成脱肥现象<sup>[25]</sup>。一般认为,基质提取液[样品质量与去离子水体积比按 1:5(W/V)]电导率在  $0.5\sim 1.5\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  范围内盐度合适,在  $1.5\sim 2.0\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  范围内为高盐度,大于  $2.0\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  时对于大部分植物来说盐度过高<sup>[21]</sup>。由图 3 可以看出,对照组土壤电导率低于  $0.5\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,而添加生物炭后的实验组高于  $0.5\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,达到盐度合适的范围,表明添加不同比例的生物炭能通过提高肥料的电导率而有效地改善土壤,从而促进植物生长。这与水稻盆栽试验中添加生物炭实验组与对照组产量关系吻合。

### 3.3 有机质

在堆肥过程中有机物被转化为二氧化碳、氨和微生物生物量等。在实验中,堆肥物质的体积和质量都有明显的降低。所有的反应器中最初均添加约 17 kg 的堆肥物质,每周从中取出 20 g 样品进行分析,取样造成的反应器中物质重量的减少可以忽略不计,所以堆肥体积和质量明显降低可能是由于含水率的降低和微生物对有机物质的分解作用所造成。生物炭含有高比例的芳香烃结构和高疏水性,因此具有相对较高的物理和化学稳定性<sup>[26]</sup>,这些性质使其具有阻止化学氧化和生物降解的功能<sup>[16, 26]</sup>,减少有机质的损失量从而提高堆肥品质。

## 4 结论

(1)添加生物炭可有效调节堆肥原料的初始含水率,并在堆肥过程中通过改善肥料物化性质来促进微生物代谢活动,从而加速堆肥成熟、加快含水率降低。

(2)添加生物炭可降低堆肥成品的电导率,并降低肥料有机质的损失量,提高肥料品质。

(3)常量元素分析显示,Ca 与 K 的含量与添加生物炭没有太大的相关性,N 的含量与生物炭添加比例

具有很好的正相关性,P 与 Mg 元素浓度则随着生物炭添加比例的增加而提高,但改变量随生物炭添加量的增加而呈现下降的趋势。

(4)水稻栽培结果表明,添加 5%生物炭肥料比添加 5%一般肥料增加干重 19%~49%,其中稻穗干重增加 49%,达到增产效果。

### 参考文献:

- [1] Lau K L, Tsang Y Y, Chiu S W. Use of spent mushroom compost to bioremediate PAH-contaminated samples[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1539-1546.
- [2] Finney K N, Ryu C, Sharifi V N, et al. The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: Comparison of thermal treatment technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(1): 310-315.
- [3] Finney K N, Sharifi V N, Swithenbank J. Combustion of spent mushroom compost and coal tailing pellets in a fluidised-bed[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(3): 860-868.
- [4] Kapu N U S, Manning M, Hurley T B, et al. Surfactant-assisted pretreatment and enzymatic hydrolysis of spent mushroom compost for the production of sugars[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 399-405.
- [5] Brunetti G, Soler-rovira P, Matarrese F, et al. Composition and structural characteristics of humified fractions during the co-composting process of spent mushroom substrate and wheat straw[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(22): 10859-10865.
- [6] Kulcu R, Sonmez I, Yaldiz O, et al. Composting of spent mushroom compost, carnation wastes, chicken and cattle manures[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(17): 8259-8264.
- [7] Rao J R, Watabe M, Stewart T A, et al. Pelleted organo-mineral fertilizers from composted pig slurry solids, animal wastes and spent mushroom compost for amenity grasslands[J]. *Waste Manag*, 2007, 27(9): 1117-1128.
- [8] Xu G, Wei L L, Sun J N, et al. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism?[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 119-124.
- [9] Wu W, Yang M, Feng Q, et al. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 47(2): 68-76.
- [10] Belyaeva O N, Haynes R J. Comparison of the effects of conventional organic amendments and biochar on the chemical, physical and microbial properties of coal fly ash as a plant growth medium[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 66(7): 1987-1997.
- [11] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 205-212.
- [12] Van Z L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2009, 327(1-2): 235-246.
- [13] Borchard N, Wolf A, Laabs V, et al. Physical activation of biochar and its meaning for soil fertility and nutrient leaching: A greenhouse experi-

- ment[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(2):177-184.
- [14] Tsai W T, Liu S C, Chen H R, et al. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(2):198-203.
- [15] Jindo K, Sanchez-monedero M A, Hernandez T, et al. Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2012, 416:476-481.
- [16] Dias B O, Silva C A, Higashikawa F S, et al. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure:Effect on organic matter degradation and humification[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(4):1239-1246.
- [17] Petric I, Šestan A, Šestan I. Influence of wheat straw addition on composting of poultry manure[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2009, 87(3):206-212.
- [18] Strom P F. Effect of temperature on bacterial specise-diversity in thermophilic solid-waste compositing.[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1985, 50(4):899-905.
- [19] Glaser B. Prehistorically modified soils of central Amazonia:A model for sustainable agriculture in the twenty-first century[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2007, 362(1478):187-196.
- [20] Jindo K, Suto K, Matsumoto K, et al. Chemical and biochemical characterization of biochar-blended composts prepared from poultry manure[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110:396-404.
- [21] Belyaeva O N, Haynes R J, Sturm E C. Chemical, physical and microbial properties and microbial diversity in manufactured soils produced from co-composting green waste and biosolids[J]. *Waste Management*, 2012, 32(12):2248-2257.
- [22] Miller F C, Finstein M S. Materials balance in the composting of wastewater sludge as affected by process control[J]. *Wat Pollut Contr Fed*, 1985, 57(2):122-127.
- [23] Rhoades J D, Shouse P J, Lesch S M, et al. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates[J]. *Soli Sci Soc AM*, 1990(54):46-54.
- [24] Corwin D L, Lesch S M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(3):445-471.
- [25] 朱翠英, 王强, 时连辉, 等. 控释肥对菇渣基质电导率及容器苗生长的影响[J]. *北方园艺*, 2009(8):1-4.
- ZHU Cui-ying, WANG Qiang, SHI Lian-hui, et al. Effect of controlled-release fertilizer on electrical conductivity of spent mushroom compost substrate and container seedlings growth[J]. *Northern Horticulture*, 2009(8):1-4.
- [26] Trompowsky P M, Bentites V D M, Madari B E, et al. Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(11):1480-1489.



## 新书推荐

### 金属矿山尾矿钝化技术与原理

本书是一本关于金属矿山尾矿钝化研究的成果专著。全书共6章,在简单介绍矿山尾矿的分类与化学组成、尾矿的环境影响、尾矿的综合利用与处理技术的基础上,系统总结作者所在研究团队十多年来对金属矿山尾矿中金属硫化物的化学及生物氧化机理、钝化剂的筛选与合成以及钝化机理方面的研究成果。这些研究成果是从源头控制酸性矿山废水产生、防治金属硫化物矿区环境污染的重要依据。

本书由科学出版社出版,党志,刘云,卢桂宁,等著。定价78.00元。可供地球化学、环境科学、矿业工程等学科的研究人员,国土资源、矿产资源、环境保护等部门的工程技术与管理人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

