

徐路魏, 王旭东. 生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1160–1166.

XU Lu-wei, WANG Xu-dong. Effect of biochar on nitrogen transformation in vegetable wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1160–1166.

生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响

徐路魏¹, 王旭东^{1,2*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了研究添加生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化处理过程中氮素转化特征的影响,分析堆肥过程中氮素的转化及损失规律,用西红柿茎蔓、玉米秸秆和猪粪按一定比例混合后添加不同比例的生物质炭,进行了为期30 d的堆肥发酵试验。结果表明,添加生物质炭能够提高堆体温度,使堆体快速进入高温期,延长高温持续时间,可降低挥发性氨的累积释放量,减少堆肥过程中的氮素损失,从而提高堆肥产品全氮的含量,并可促进堆肥后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化,提高非酸水解态氮的含量。添加生物质炭有利于堆肥的腐熟,在堆肥第18 d添加较高比例的生物质炭的处理其 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}\leq 0.5$,堆肥产品达到腐熟。综合保氮和腐熟效果,蔬菜废弃物在堆肥化过程中以添加10%的生物质炭为最佳。

关键词:蔬菜废弃物;生物质炭;堆腐;氮素转化;有机态氮

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)06-1160-07 doi:10.11654/jaes.2016.06.019

Effect of biochar on nitrogen transformation in vegetable wastes during composting

XU Lu-wei¹, WANG Xu-dong^{1,2*}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Aerobic composting is an effective way to dispose vegetable wastes. However, nitrogen losses in vegetable wastes during composting greatly decrease the effectiveness of compost fertilizers. Here the effect of biochar on nitrogen transformation in vegetable wastes was investigated in a 30 day composting experiment using tomato plants, corn stover and swine manure mixture amended with different rates of biochar. Results showed that additions of the biochar had the compost pile enter into the high temperature phase earlier, extended the high-temperature duration, and decreased NH_3 emissions and nitrogen losses, thus increasing total nitrogen content in the composted products. Adding biochar also promoted transformation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ to $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (nitrification process) at the late stage and improved the content of unhydrolysable nitrogen. In addition, applying biochar facilitated compost maturing and lowered the ratio of $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ to ≤ 0.5 on the 18th day. Based on the present results, the optimum rate of biochar addition for nitrogen conservation and compost maturity would be about 10%.

Keywords: vegetable waste; biomass charcoal; composting; nitrogen transformation; organic nitrogen formation

随着农村产业结构的调整,蔬菜作物的种植在农业中所占比重越来越大^[1],同时也产生了大量的蔬菜废弃物^[2]。这些废弃物随意堆置于田间地头、街道和公路两旁,不仅会造成资源的巨大浪费,而且在其腐烂变质过程中会产生恶臭和大量的蝇、蚊、虫等,

严重污染大气、水和土壤资源,还直接影响到人类的健康^[1,3]。如何处理这些蔬菜废弃物,已成为制约蔬菜产业发展的一个重要因素。

高温好氧堆肥被认为是一种固体废物资源化、无害化、减量化的有效手段,可以促使有机废物稳定,并在高温发酵时杀死病原菌,堆肥产品无公害,且富含有机质和植物生长所必需的矿质元素,可以用作有机肥和土壤改良剂,具有一定的经济效益、社会效益和生态效益^[4]。但好氧堆肥氮素损失量大,可达50%~80%^[5],不仅会污染环境、危害人体健康,还会降低堆

收稿日期:2015-12-04

基金项目:“十二五”国家科技支撑项目(2012BAD14B11);杨凌示范区科技计划项目(2014SF-02)

作者简介:徐路魏(1990—),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事有机肥研究。E-mail: xuluwei0@163.com

* 通信作者:王旭东 E-mail: wangxudong01@126.com

肥产品的氮素营养品质^[6]。堆肥过程中氮素损失途径主要有氨气挥发、反硝化以及淋溶损失^[7]。生物质炭是生物质原料经高温裂解而形成的黑色固体,是一种难溶、稳定、高度芳香化、富含碳素的黑色蓬松状固态物质^[8],具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积^[9]。添加生物质炭,一方面能够吸附堆肥过程中产生的氨气和铵态氮,另一方面生物质炭能够促进微生物的活动,提高繁殖率以及种群数量,在堆肥过程中能够通过生物氧化作用提高表面酸性基团,特别是羧基团,与铵态氮结合从而减少氮素以氨气的形式挥发,降低氮素损失^[10]。鉴于通过添加小麦秸秆、玉米秸秆、沸石^[4,11-12]等调理剂减少堆肥氮素损失的研究较多,本文研究添加不同比例的生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化处理的影响,旨在为蔬菜废弃物堆肥化处理过程中减少氮素损失提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试西红柿茎蔓取自杨陵区的蔬菜大棚,玉米秸秆取自西北农林科技大学农场,经晒干粉碎。猪粪取自杨凌本香农业产业集团有限公司养殖场。生物质炭由杨陵亿鑫生物能源科技开发有限公司提供,该生物质炭是由苹果树枝条在 600 ℃ 的高温厌氧下生成。堆肥物料的基本性质见表 1。

表 1 供试原料的基本性质(%)

Table 1 Basic properties of compost materials(%)

原料	全 C	全 N	含水量
西红柿茎蔓	38.76	2.03	81.09
玉米秸秆	38.97	0.93	5.32
猪粪	37.26	3.13	26.81
生物质炭	80.01	1.27	1.13

1.2 试验设计

试验共设置 7 个处理(表 2),每个处理设置 2 个重复。将西红柿茎蔓和玉米秸秆粉碎至长度小于 5 cm,按 2:1(体积比)调配,加入 20%的猪粪(体积比),进行混合,在此基础上添加不同比例的生物质炭(体积比)混合均匀,调节含水量为 65%左右,进行自然堆肥,前期每 2 d 翻拌一次,后期(18 d 后)每 4 d 翻拌一次。在堆肥的第 0、3、6、9、12、15、18、21、25、30 d,于表层、中层、底层的 3 个点采样,分别混合均匀,四分法取 500 g 左右,将剩余样品放回发酵桶中(250 L)继续发酵。采集的鲜样除直接用于挥发性氮测定外,一部

表 2 不同处理的生物质炭添加比例

Table 2 Biochar addition rates in different treatments

处理	发酵主料	生物质炭占混合物料的比例/%
处理 1	西红柿茎蔓+玉米秸秆+猪粪	0
处理 2	西红柿茎蔓+玉米秸秆+猪粪	2.5
处理 3	西红柿茎蔓+玉米秸秆+猪粪	5
处理 4	西红柿茎蔓+玉米秸秆+猪粪	7.5
处理 5	西红柿茎蔓+玉米秸秆+猪粪	10
处理 6	西红柿茎蔓+玉米秸秆+猪粪	12.5
处理 7	西红柿茎蔓+玉米秸秆+猪粪	15

分保存于 4 ℃ 冰箱中,用于硝态氮、铵态氮测定,另一部分风干后备用。

1.3 测定项目及方法

每天上午 10:00 时和下午 16:00 时测定堆肥中心温度,重复 3 次。全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,凯氏定氮法测定;灰分采用常压二步法^[13];挥发性氮采用扩散皿法测定,即硼酸吸收标准酸滴定^[14];硝铵态氮采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KCl}$ 浸提,流动分析仪测定^[15];有机氮采用 Bremner 法,用 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HCl}$ 消解样品,将有机氮分为酸水解有机氮和非酸水解有机氮,凯氏定氮法进行测定^[16]。

1.4 氮素损失率的计算

根据腐熟过程灰分无损失原理,氮素损失率计算公式为:

$$N_L = (N_0 - N_n \cdot H_0 / H_n) / N_0$$

式中: N_L 表示氮素损失率; N_n 表示不同采样时期全氮含量; N_0 表示腐解开始时的全氮含量; H_0 表示腐解开始时灰分含量; H_n 表示不同采样时期灰分含量^[17]。

1.5 数据处理

实验数据采用 Microsoft Office Excel 2007 进行整理,SAS 统计软件和 SigmaPlot 10.0 软件进行统计分析作图。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度变化

温度是影响堆肥进程和堆肥品质的重要因素^[18]。堆肥过程主要经历升温期、高温期、降温期和腐熟期。

从图 1 可以看出,堆体温度先升高后降低,最后趋于环境温度。对照处理(处理 1)在第 8 d 达到最高温度(53.5 ℃),但没有达到高温阶段温度要求(≥ 55 ℃),堆肥结束时趋于环境温度。与对照相比,添加不同比例生物质炭的处理在堆肥第 4~5 d 进入高温阶段,高温期历时 8~9 d,比对照处理的最高温度高出 8

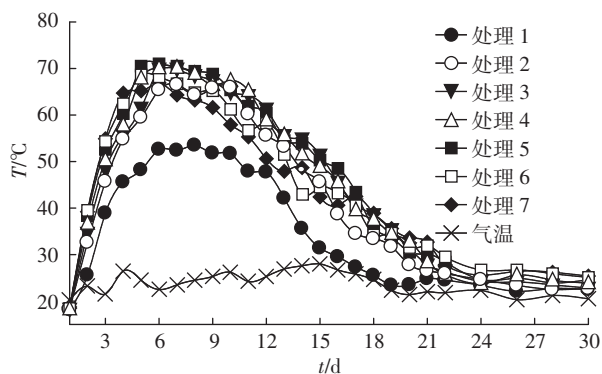


图1 堆肥过程中温度变化

Figure 1 Changes of temperature during composting

℃左右。生物质炭添加比例为10%的处理(处理5)在堆肥第4 d进入高温阶段,第6 d达到最高温度(71℃)。添加生物质炭可以促使堆肥快速进入高温阶段,提高高温阶段的堆体温度,延长高温时间,促进堆肥腐熟。

2.2 全氮含量的变化

全氮是判断堆肥品质的一个重要指标。图2反映出,在腐解过程中各处理的全氮含量总体上呈先降低后期略有升高的变化规律。对照处理的全氮含量0~15 d快速降低,在15~30 d缓慢降低。与对照相比,添加生物质炭处理的全氮含量在0~15 d快速降低,在15~21 d缓慢降低,21~30 d略有升高。腐解前期,堆肥物料快速分解,有机氮的矿化和氨气挥发损失,导致全氮含量快速降低,后期铵态氮转化为硝态氮且腐殖化作用大于矿化作用,氨气挥发减少,使得全氮含量趋于稳定并略有回升。堆肥结束时,各处理的全氮含量分别比堆肥初期降低了28.25%、25.68%、20.46%、19.19%、17.43%、19.63%、22.28%;添加生物质炭处理的堆肥产品(处理2~7)的全氮含量分别比对照处理高

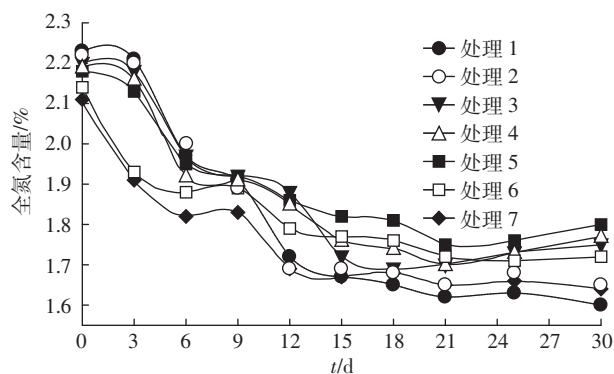


图2 堆肥过程中全氮含量的变化

Figure 2 Changes of TN during composting

3.13%、9.38%、10.63%、12.50%、7.50%、2.50%。在堆肥结束时,添加10%的生物质炭处理(处理5)的全氮含量降低最少,全氮含量最高。这说明添加10%的生物质炭相对于其他处理更有利于堆肥的保氮,降低氮素损失。

2.3 无机氮的变化趋势

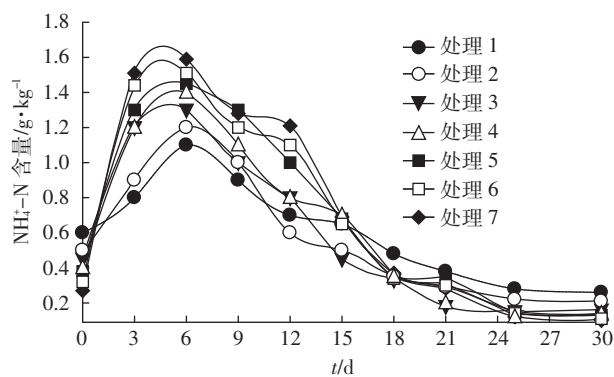
2.3.1 铵态氮和硝态氮的变化

从图3可以看出, NH_4^+-N 含量总体呈先升高后降低的变化规律。对照处理的 NH_4^+-N 含量在堆肥初期快速升高,在第6 d达到最大值,随着堆肥时间的增加, NH_4^+-N 含量逐渐降低,堆肥后期保持相对稳定。和对照相比,添加生物质炭处理的 NH_4^+-N 含量在堆肥初期(第0 d)略有降低,第3 d高于对照,第6 d达到峰值,第15 d开始逐渐低于对照处理,说明添加生物质炭能够促进堆肥前期的氨化作用和后期的硝化作用。各处理在堆肥结束时比堆肥初期 NH_4^+-N 含量分别降低了56.67%、58.00%、64.44%、65.00%、65.79%、65.63%、62.96%;添加生物质炭的堆肥产品比对照处理的 NH_4^+-N 含量分别降低了19.23%、38.46%、46.15%、50.00%、57.69%、61.54%。

与 NH_4^+-N 相比,各处理的 NO_3^--N 含量在堆肥初期较低,堆肥的第6~15 d快速升高,之后趋于稳定(图4)。这是由于前期堆体温度较高,以氨化作用为主,有机氮在微生物的作用下大部分转化为铵态氮,后期堆肥温度降低,硝化作用加强,铵态氮转化为硝态氮,硝态氮含量快速升高^[9]。在堆肥结束时,各处理的 NO_3^--N 含量比堆肥初期分别增加了318.75%、435.71%、507.69%、583.33%、608.33%、561.54%、709.09%。

2.3.2 铵态氮/硝态氮的变化

$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 值是判断堆肥腐熟程度的一个重要指标^[20]。从图5可以看出 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 值呈先升

图3 堆肥过程中 NH_4^+-N 的变化Figure 3 Changes of NH_4^+-N during composting

高后降低的变化规律。对照处理的 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 值在堆肥第6 d达到最大,第25 d堆肥腐熟($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} \leq 0.5$)。添加生物质炭处理的 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 的最大值和腐熟度($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} \leq 0.5$)都略有提前,生物质炭添加比例为10%、12.5%、15%的处理峰值提前到第3 d,其他处理则与对照相同;在堆肥第21 d,处理2和处理3达到腐熟($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} \leq 0.5$),而处理4、处理5、处理6和处理7在第18 d达到腐熟,说明添加生物质炭促进堆肥腐解和氮素转化,加快堆肥腐熟。

2.4 挥发性氨的变化

从图6可以看出,堆肥过程中各个处理的 NH_3 的释放量均呈先升高后降低的变化规律。在堆肥第0~3 d施加生物质炭的处理比对照的挥发性氨释放量高,随着堆肥的进行对照处理的挥发性氨的释放量逐渐高于其他处理。对照处理在堆肥的第9 d达到最大值 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,随后逐渐降低。和对照相比,添加生物质炭处理降低了挥发性氨释放量的峰值,其中添加生物质炭比例为10%处理(处理5)峰值最低,并随生物质炭添加量的增加其峰值也提前到第6 d。这是

由于堆肥初期氨化作用较强,有机氮矿化产生大量铵态氮,铵态氮在碱性环境下转化为氨气,造成氮素损失,生物质炭具有多空结构 and 较强的吸附能力,能够吸附部分氨气和铵态氮,减少氨挥发损失。添加不同比例的生物质炭其保氮效果大小不同,从总体上看生物质炭添加比例10%的处理挥发性氨的释放量较低,说明生物质炭添加比例10%最有利于降低堆肥的挥发性氨的释放。

2.5 有机态氮的变化

有机氮是堆肥产品中氮素的主要存在形式^[21],是交换性铵和硝态氮的源和汇^[22]。堆肥过程中有机氮不断累积、矿化和固定,其含量能够反映出微生物对氮素的转化和利用情况。

从图7可以看出,酸水解有机氮总体呈先降低后升高的变化规律。添加生物质炭处理的酸水解有机氮含量在堆肥前期和中期低于对照处理,堆肥第18 d逐渐高于对照,堆肥后期有不同程度的升高。在堆肥结束时,各处理的酸水解有机氮含量比堆肥初期分别降低了45.22%、40.26%、36.24%、28.57%、24.31%、20.00%、

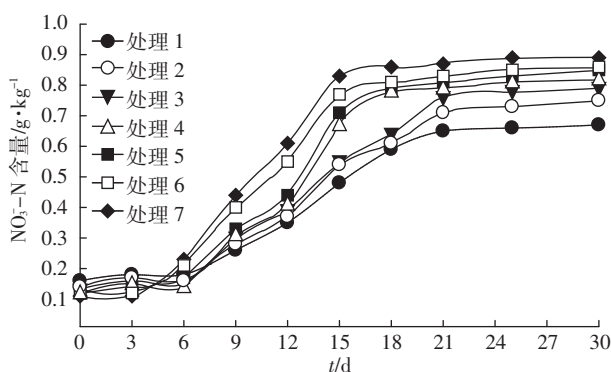


图4 堆肥过程中 NO_3^--N 的变化

Figure 4 Changes of NO_3^--N during composting

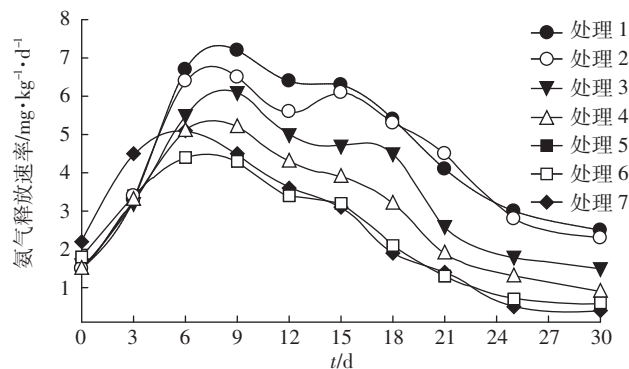


图6 不同处理挥发性氨释放速率的变化

Figure 6 Changes of volatile ammonia in different treatment during composting

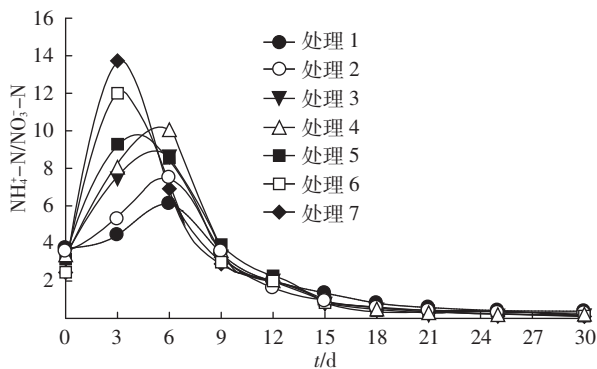


图5 堆肥过程中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值的变化

Figure 5 Changes of $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ during composting

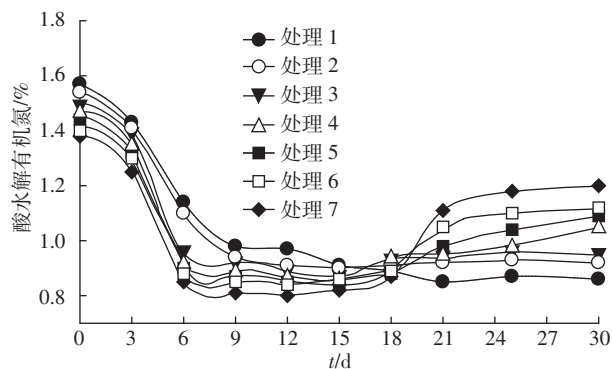


图7 腐解过程中酸水解有机氮的变化

Figure 7 Changes of THN during composting

13.04%; 酸水解有机氮浓度随生物质炭添加量的增加而增加, 添加生物质炭处理的酸水解有机氮比对照处理分别增加了 6.98%、10.47%、22.09%、26.74%、30.23%、39.53%, 说明添加生物质炭有利于堆肥产品有机态氮的保存。

图 8 所示, 各处理的非水解有机氮浓度总体上呈逐渐升高的变化规律。与对照相比, 堆肥初期(第 0 d)添加生物质炭处理的非水解有机氮有所降低。堆肥结束时, 非水解有机氮浓度比堆肥初期分别增加了 31.43%、41.18%、62.50%、90.32%、82.35%、96.88%、93.94%; 非水解有机氮浓度随生物质炭添加量的增加而增加, 添加生物质炭处理的非水解有机氮比对照处理分别增加了 4.35%、13.04%、28.26%、34.78%、36.96%、39.13%, 说明生物质炭促进堆肥后期非酸水解有机氮的形成, 有机氮的稳定性提高, 减少氮素损失。

2.6 堆肥产物的氮素损失率

堆肥过程中氮素损失不仅会污染环境, 还会造成资源浪费, 使堆肥产品的氮素营养下降。堆肥过程中的氮素损失主要有氨气挥发、反硝化作用、淋溶损

失^[2]。图 9 表明, 堆肥结束时, 随着生物质炭用量的增加, 氮素损失率先降低后增加的变化趋势。和对照处理相比, 处理 2 的氮素损失率差异不显著, 处理 3、处理 4、处理 5 显著降低, 其中以处理 5 的最低(添加比例为 10%), 氮素损失率仅为 24.60%, 比对照降低了 37.88%。与处理 5 相比, 处理 6、7 的氮素损失率略有增加, 但差异不显著。说明当生物质炭添加比例过高(超过 10%)时保氮效果有所降低。

3 讨论

氮素在堆肥过程中的转化主要包括有机氮的矿化、硝化和反硝化、氨气吸附和挥发以及有机氮的合成。一方面, 有机氮经矿化作用转化为无机氮, 部分以氨气形式挥发损失, 部分与水结合形成铵态氮, 铵态氮在硝化细菌的作用下进一步转化为硝态氮, 部分硝态氮经反硝化作用产生氮气、氧化亚氮等; 另一方面通过微生物的代谢合成可将部分氮素转化为腐殖质的一部分^[23]。在采用密封装置不存在渗漏的情况下, 这个过程中引起氮素损失的主要是氨气挥发和反硝化作用^[24]。增加堆肥介质对氨的吸附, 促进无机氮向有机氮转化, 可减少氮素损失。生物质炭是多孔隙结构和较强吸附能力的惰性有机碳为主构成的材料^[25-26], 能够吸附堆肥过程中产生的部分氨气和铵离子, 同时调节微生物的活性, 促进对氮素的生物固定, 从而达到保氮效果^[12]。刘微等^[12]通过研究不同添加剂对番茄秸秆鸡粪好氧堆肥的影响, 表明秸秆生物质炭相较于泥炭和沸石更有利于提高堆肥全氮含量, 减少氮素损失。

堆肥过程中, 氨气挥发造成了氮素的大量损失。氨挥发主要与铵态氮浓度、温度、pH 值、堆体的孔隙度^[27-28]等因素有关。添加生物质炭后, 初期堆体温度升高较快和堆体的碱性环境, 使挥发性氨释放量逐渐增加, 在堆肥第 6 d 低于对照处理的挥发性氨释放量, 中后期的挥发性氨释放量随生物质炭添加比例的增加而降低。在堆肥过程中, 挥发性氨的释放量先升高后降低, 全氮含量先下降后期略有升高, 铵态氮含量先升高后降低, 硝态氮则逐渐升高。这与王海候等^[10]和张广杰^[29]的研究结果相似。

有机氮是堆肥产品氮素的主要存在形式, Bremner 法将有机氮分为酸水解有机氮和非酸水解有机氮, 酸水解有机氮包括氨基酸态氮、酰胺态氮和非知态氮, 其中氨基酸态氮和酰胺态氮可通过微生物作用分解为无机态氮, 供作物吸收利用。生物质炭的高孔

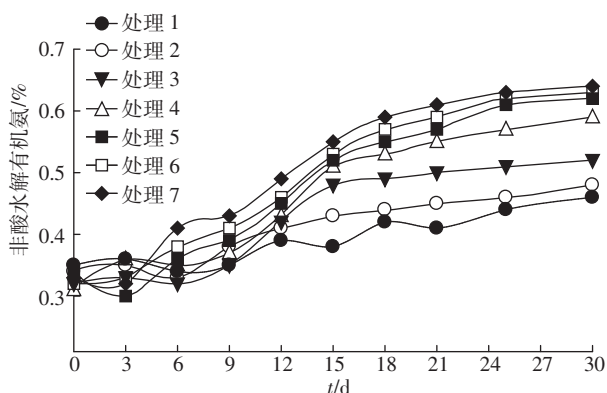
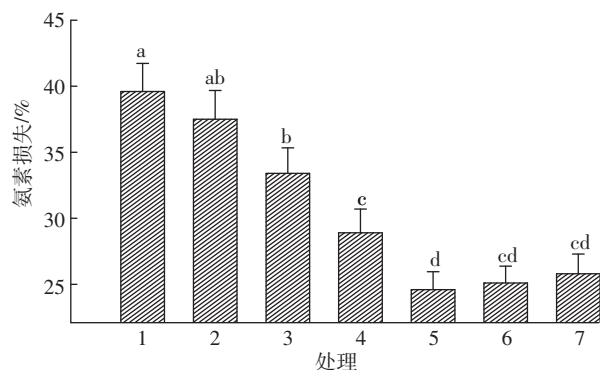


图 8 腐解过程中非酸水解有机氮的变化

Figure 8 Changes of UTHN during composting



不同小写字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$

图 9 不同处理的氮素损失率

Figure 9 Changes of nitrogen losses during composting

隙结构,能够为微生物提供附着点,有利于微生物的繁殖,促进堆肥前期微生物分解有机碳、氮化合物,使有机氮含量降低^[11-12],堆肥后期腐殖化作用加强,氮素在微生物作用下形成复杂的腐殖质态有机氮,从而促进非酸水解有机氮的形成,提高有机氮的稳定性,也可减少无机氮的损失。在系列添加生物质炭下,当比例为5%以上时就有较明显的保氮效果,添加到10%的效果最显著,氮素损失率最低为24.60%,而过多的添加生物质炭则加大了氮素损失。这可能是由于生物质炭自身为偏碱性,若添加量过多,引起氨气挥发加剧^[30],造成氮素损失,其具体原因还有待于进一步深入研究。

4 结论

(1)堆肥过程中,添加不同比例的生物质炭可以降低氨气的释放量,减少氮素损失。堆肥结束时,添加10%生物质炭的处理,全氮浓度最高,氮素损失率最低为24.60%,保氮效果最好。

(2)添加生物质炭减少堆肥过程中氮素损失的内在原因是增加后期堆肥产品中非酸水解有机氮的含量,减少有机氮的矿化,有利于铵态氮向硝态氮转化,减少氨挥发损失。

(3)堆肥过程中,添加生物质炭有利于铵态氮向硝态氮转化,促进堆肥的腐熟,并随生物质炭添加量的增加腐熟效果越好。

参考文献:

- [1] 黄鼎曦,陆文静,王洪涛. 农业蔬菜废物处理方法研究进展和探讨[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(11):38-42.
HUANG Ding-xi, LU Wen-jing, WANG Hong-tao. Progress on study of agricultural vegetable waste treatment [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(11):38-42.
- [2] 孙振钧,孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能源利用的现状与发展[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(1):6-13.
SUN Zhen-jun, SUN Yong-ming. Situation and development of agriculture residues as energy resource utilization in rural areas in China[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(1):6-13.
- [3] 龚建英,田锁霞,王智中,等. 微生物菌剂和鸡粪对蔬菜废弃物堆肥化处理的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8):2813-2817.
GONG Jian-ying, TIAN Suo-xia, WANG Zhi-zhong, et al. Effect of inoculation and poultry dung on composting of vegetable residues[J]. *Chinese Journal of Environment Engineering*, 2012, 6(8):2813-2817.
- [4] 姜继韶,黄懿梅,黄 华,等. 猪粪秸秆高温堆肥过程中碳氮转化特征与堆肥周期探讨[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11):2511-2517.
JIANG Ji-shao, HUANG Yi-mei, HUANG Hua, et al. Carbon and nitrogen dynamics and stabilization time of a swine manure-straw compost [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11):2511-2517.
- [5] 孙文彬. 生物质炭对城市污泥好氧堆肥过程中碳素转化及堆肥品质的影响[D]. 重庆:西南大学, 2013.
SUN Wen-bin. Effect of biochar on transformation of organic matter during sewage sludge composting and quality of compost[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [6] 黄国锋,钟流举,张振钿,等. 猪粪堆肥化处理过程中的氮素转变及腐熟度研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11):1459-1462.
HANG Guo-feng, ZHONG Liu-ju, ZHANG Zhen-tian, et al. On nitrogen transformations and maturity during composting of pig manure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11):1459-1462.
- [7] 熊建军,刘淑英,邹元国,等. 高温堆肥过程中除臭保氮技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1):444-448.
XIONG Jian-jun, LIU Shu-ying, ZOU Yuan-guo, et al. Research progress on deodorizing and reducing nitrogen loss from high temperature compost system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1):444-448.
- [8] 林雪原,荆延德,巩 晨,等. 生物炭吸附重金属的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5):83-87.
LIN Xue-yuan, JING Yan-de, GONG Chen, et al. Research progress on the sorption of heavy metals by biochar[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(5):83-87.
- [9] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 102(3):3488-3497.
- [10] 王海候,沈明星,涂荣文,等. 生物质炭对伊乐藻堆肥过程氮挥发的作用效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2266-2272.
WANG Hai-hou, SHEN Ming-xing, TU Rong-wen, et al. Effect of biochar on ammonia volatilization during elodea composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2266-2272.
- [11] 黄懿梅,苟春林,梁军峰. 两种添加剂对牛粪秸秆堆肥化中氮素损失的控制效果探讨[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1219-1225.
HUANG Yi-mei, GOU Chun-lin, LIANG Jun-feng. Effect of two amendments on nitrogen loss from composting of cattle manure and corn straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1219-1225.
- [12] 刘 微,霍 荣,张 津,等. 生物质炭对番茄秸秆和鸡粪好氧堆肥氮磷钾元素变化的影响及其机理[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):289-294.
LIU Wei, HUO Rong, ZHANG Jin, et al. Effect of biochar on N, P and K transformation of tomato straw and chicken manure composting and mechanisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):289-294.
- [13] 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.
- [14] Keiluweit M, Kleber M, Sparrow M A, et al. Solvent-extractable polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar: Influence of pyrolysis temperature and feedstock[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(17):9333-9341.

- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000.
- [16] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[M]//Black C A. Methods of soil analysis. Agronomy 9. Madison. Wisconsin: American Society of Agronomy Incorporation, USA. 1965: 1148-1178.
- [17] 曹喜涛, 黄为一, 常志州, 等. 鸡粪堆制过程中氮素损失及减少氮素损失的机理[J]. 江苏农业学报, 2004, 20(2): 106-110.
- CAO Xi-tao, HUANG Wei-yi, CHANG Zhi-zhou, et al. Mechanism of nitrogen loss and reduction in nitrogen loss during the compost of chicken manure[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Sciences*, 2004, 20(2): 106-110.
- [18] Agnew J M, Leonard J. The physical properties of compost[J]. *Compost Science & Utilization*, 2003, 11(3): 238.
- [19] 鲍艳宇, 周启星, 颜 丽, 等. 鸡粪堆肥过程中各种氮化合物的变化及腐熟度评价指标[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1532-1537.
- BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamics of organic carbons during composting of chicken manure and evaluation of maturity parameters[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1532-1537.
- [20] Bernai M P, Paredes C, Sánchez-Monedero M A, et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 63(1): 91-99.
- [21] Tiquia S M, Tam N F Y. Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles[J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(8): 869-880.
- [22] 张雪辰, 王旭东. 畜禽粪便快速发酵过程中的氮素转化及损失[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 458-464.
- ZHANG Xue-chen, WANG Xu-dong. Nitrogen transformation and loss in livestock and poultry manure mixture during rapid composting process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 458-464.
- [23] 李忠徽, 王旭东. 不同发酵辅料下牛粪腐解过程温度和养分的变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 471-477.
- LI Zhong-hui, WANG Xu-dong. Changes of temperature and nutrients in cow dung with different amendments during composting process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 471-477.
- [24] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 禽畜粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 247-254.
- HUANG Xiang-dong, HAN Zhi-ying, SHI De-zhi, et al. Nitrogen loss and control during live stock manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 247-254.
- [25] 赵世翔, 姬 强, 李忠徽, 等. 热解温度对生物质炭及其在土壤中矿化作用的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 183-200.
- ZHAO Shi-xiang, JI Qiang, LI Zhong-hui, et al. Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agriculture Machinery*, 2015, 46(6): 183-200.
- [26] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J]. *Chemosphere*, 2014, 99(6): 19-33.
- [27] 罗一鸣, 魏宗强, 孙钦平, 等. 沸石作为添加剂对鸡粪高温堆肥氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 243-247.
- LUO Yi-ming, WEI Zong-qiang, SUN Qin-ping, et al. Effects of zeolite addition on ammonia volatilization in chicken manure composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 243-247.
- [28] 屠巧平. 生物质炭添加对猪粪堆肥腐殖化的影响及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- TU Qiao-ping. Effects of biochar on humification on pig manure composting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [29] 张广杰. 添加不同比例橡木炭对猪粪好氧堆肥的形象研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- ZHANG Guang-jie. Effect of different proportions of oak charcoal on composting of pig manure with rice husk under aerobic condition[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2014.
- [30] 陶金沙, 李正东, 刘福理, 等. 添加小麦秸秆生物质炭对猪粪堆肥腐熟程度及温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1233-1239.
- TAO Jin-sha, LI Zheng-dong, LIU Fu-li, et al. Effects of wheat straw biochar on maturity extent and greenhouse gases emissions during swine manure composting[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1233-1239.