

付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿, 等. 生物质炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1893–1900.
FU Xiang-feng, LIU Qi-qi, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar on nitrogen transformation and greenhouse gas emissions during swine manure composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1893–1900.

生物质炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响

付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿*, 潘根兴, 郑金伟, 张旭辉, 程 琨

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要: 为了解不同比例生物质炭的添加对猪粪和稻草堆肥过程中氮素损失及温室气体排放的影响, 监测了堆置过程中铵态氮、硝态氮、氨挥发及温室气体的变化。试验设猪粪秸秆对照(B0)以及猪粪秸秆中添加 5%(B1)、10%(B2)、15%(B3)生物质炭共 4 个处理。结果表明: 添加生物质炭能够提高堆体温度, 缩短堆肥周期, B3 处理的堆体比 B0 处理提前 3 d 进入高温期; 高温期 B0、B1、B2、B3 各处理堆体中 NH_4^+ 含量分别比初始值增加 6.6%、41.8%、51.9%、48.6%。与 B0 相比, 添加生物质炭能够显著增加高温期堆体 NH_4^+ 含量, 减少高温期 NH_4^+ 向 NH_3 的转化, 显著降低堆肥过程中的氨挥发, 其中 B1、B2、B3 氨挥发累计量比 B0 分别减少 23.1%、68.6%、78.4%; B2 处理与 B0 相比能够显著减少 CO_2 排放总量, 而 B1、B3 处理效果不显著, 但能够显著减少堆肥过程中 CH_4 的排放; 与 B0 相比, 添加生物质炭处理 CH_4 排放总量降低 16.3%~23.5%, 且可显著降低堆肥过程中 N_2O 的排放, 其中 B2、B3 的 N_2O 排放总量比 B0 减少 70.7%。

关键词: 生物质炭; 猪粪; 氮素损失; 温室气体; 堆肥

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)09-1893-08 **doi:** 10.11654/jaes.2017-0182

Effects of biochar on nitrogen transformation and greenhouse gas emissions during swine manure composting

FU Xiang-feng, LIU Qi-qi, LI Lian-qing*, PAN Gen-xing, ZHENG Jin-wei, ZHANG Xu-hui, CHENG Kun

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Nitrogen loss and greenhouse gas emissions are the main problems resulting from the composting of livestock manure. To address this issue, a composting experiment with biochar additions of 0% (B0), 5% (B1), 10% (B2), and 15% (B3) was conducted, and ammonium and nitrate concentrations, ammonia volatilization, and greenhouse gas emissions were monitored to investigate the effects of biochar on nitrogen loss and greenhouse gas emissions during the composting of pig manure and straw. The results showed that the addition of biochar could increase the composting temperature, and the thermophilic stage arrived 3 to 5 days in advance of that of the control. NH_4^+ content under the B0, B1, B2, and B3 treatments was higher by 6.6%, 41.8%, 51.9%, and 48.6% than the initial value, respectively. In addition, the ammonia volatilization was lower by 23.1%, 68.6%, and 78.4% under B1, B2, and B3 treatments than that of the control, respectively. Biochar addition could decrease methane and nitrous oxide emissions by 16.3%~23.5% and 50.2%~70.7%, respectively, while CO_2 emissions were significantly decreased by 20.9% under the B2 treatment from that in the control. In summary, the composting period was shortened and the nitrogen loss and greenhouse gas emissions were reduced when applying biochar for manure composting.

Keywords: biochar; swine manure; nitrogen loss; greenhouse gas; composting

收稿日期: 2017-02-17

作者简介: 付祥峰(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事生物质炭在农业中的应用研究。E-mail: fuxiangfeng89@163.com

* 通信作者: 李恋卿 E-mail: lqli@njau.edu.cn

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(12)3039); 公益性行业(农业)科研专项经费项目子课题(201303095-11)

Project supported: Jiangsu Agricultural Science and Technology Independent Innovation Fund Project(CX(12) 3039); Subproject of special funds for public welfare industry (agriculture)(201303095-11)

近年来,随着畜牧养殖业集约化的迅速发展,产生了大量的畜禽粪便,据估算,2009年中国畜禽养殖业粪便排放总量为32.64亿t^[1]。畜禽粪便经堆肥处理既可达到减量化、无害化、稳定化,也可使其中的速效养分更利于植物吸收,提高作物的产量、改善作物的品质,是一种优质的有机肥^[2]。然而堆肥过程中常会释放出大量NH₃、H₂S等恶臭气体,同时造成堆肥中氮素养分的大量损失,从而使堆肥的农用价值降低^[3]。研究表明,由于堆肥过程中NH₃排放导致的氮素损失可达总氮损失的32.3%~50.0%^[4-5]。此外,堆肥过程中还会产生大量的温室气体(CH₄、N₂O),对环境造成污染^[6]。

生物质炭是生物质经低温限氧热裂解制成,因其具有丰富的孔隙度和比表面积等特性^[7],作为一种新的添加剂在好氧堆肥中的应用也逐渐引起人们的关注。研究表明,猪粪堆肥过程中添加3%竹炭可显著加快堆体腐熟进程,显著降低NH₃的挥发,减少10%氮素损失,有利于氮素的保持^[8]。Chowdhury等^[9]研究发现,在鸡粪堆肥过程中通风和添加生物质炭均能减少NH₃的排放,与对照相比温室气体排放能够显著减少27%~32%。但目前有关添加生物质炭对猪粪堆肥腐熟过程中氮素转化、氨挥发以及温室气体排放等方面综合影响的研究还较少。因此,本研究通过在猪粪堆肥中添加生物质炭,研究生物质炭对猪粪堆肥腐熟过程中氮素保持及温室气体排放的影响,以期探讨降低堆肥过程中氨挥发损失及温室气体排放的有效途径。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试猪粪采自南京市六合区农户散养猪舍。南京市六合区勤丰秸秆科技有限公司生产的水稻秸秆生物质炭,经炭化炉在450℃低温限氧条件下制备。水稻秸秆取自六合区当地农户,粉碎成5cm左右备用。堆肥物料基本性质如表1。

1.2 试验设计

试验设置4个处理:猪粪400kg+秸秆50kg(对照,B0),猪粪400kg+秸秆50kg+5%(质量比,下同)

生物质炭(B1),猪粪400kg+秸秆50kg+10%生物质炭(B2),猪粪400kg+秸秆50kg+15%生物质炭(B3)。将各处理堆肥物料混合均匀,调节含水率为65%。

堆肥试验于2016年3月至4月在室外常温下进行。每个处理设置三个堆体,随机排列,堆体长宽高分别为1.5m×1.0m×0.8m,相邻堆体间距离为0.5m。堆肥期间采用人工翻堆,每3~4d翻堆一次。翻堆时加入适量的水,使堆体的含水量维持在65%。

1.3 堆肥样品采集及指标测定

堆肥样品在每次翻堆后采集,每堆体各选取三个平行点进行混合样品采集^[8]。每个样品分两份:一份装入无菌塑料袋中储存在4℃冰箱中,用于pH、电导率(EC)、可溶性有机碳(DOC)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)等指标的测定;另一份自然风干,粉碎并过80目筛,用于全碳(TC)、全氮(TN)和粗灰分等指标的测定。

温度:采用0~100℃的玻璃棒式温度计,将温度计从堆体侧面高40cm处中间水平插入堆体中部,插入深度为30cm,测定堆体中部温度。温度测定固定在上午10:00。

pH值和电导率:固液比1:10(鲜质量:体积),用蒸馏水浸提鲜样,静置0.5h,然后分别用S-3C型pH计测悬液pH值,用DDS-11A型电导率仪测定EC值。

NH₄⁺-N和NO₃⁻-N:固液比1:10(鲜质量:体积),新鲜堆肥样品加入2mol·L⁻¹KCl,振荡1h后过滤,用流动分析仪测定滤液中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量。

1.4 堆肥气体监测

氨挥发采用李冰的方法^[10]进行测定,将装有20mL硼酸吸收液(浓度为20g·L⁻¹)的100mL小烧杯放在堆体表面,用已知截面积的2000mL烧杯将硼酸吸收瓶盖住,烧杯口周围用堆肥密封,收集烧杯覆盖范围挥发的NH₃,待硼酸变蓝,取出用0.2mol·L⁻¹硫酸滴定,并记录吸收时间,计算氨挥发速率。

堆肥过程中温室气体(CH₄、N₂O、CO₂)的排放采用静态暗箱-气相色谱法^[11]测定。采样箱的规格为35cm×35cm×23cm。每隔3d采集一次,温室气体采样在翻堆前进行,采气时间在上午8:00—10:00,在采集

表1 堆肥物料基本性质

Table 1 The basic properties of compost material

材料	TN/g·kg ⁻¹	有机碳/g·kg ⁻¹	C/N	含水率/%	pH(H ₂ O)	EC/mS·cm ⁻¹	总孔隙/cm ³ ·g ⁻¹	比表面积/m ² ·g ⁻¹
猪粪	28.3	383.2	13.6	74	7.5	1.2	—	—
秸秆	12.6	437.5	34.8	21	—	—	—	—
生物质炭	11.2	591.1	52.7	36	10.0	3.9	0.041	18.29

气样的同时记录采集箱内的温度。气体样品带回实验室,用安捷伦气相色谱仪(Agilent7890A)测定。

1.5 数据处理与统计分析

试验数据的整理和图表的制作采用 Microsoft Excel 2013 进行。不同处理间差异及相关性分析采用 SPSS 18.0 进行,以 LSD 法进行显著性检验($P<0.05$)。测定结果均以平均值 \pm 标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对堆肥堆体特性的影响

2.1.1 生物质炭对堆体温度的影响

堆肥过程中堆体温度变化如图 1 所示。B1 和 B2 处理的升温期、高温期和降温期分别为第 1~6 d、7~13 d 和 14~25 d, B3 处理在第 5 d 进入高温期,而 B0 处理的三个时期依次为第 1~9 d、10~15 d 和 16~25 d。生物质炭处理的堆体温度在第 7~13 d 内均保持在 50~54 °C,其中 B3 处理的堆体温度在升温期升温速度较快,在第 7 d 时升到 50 °C,且在第 11 d 达到最高温度 55 °C, B1、B2 处理的堆体在第 10 d 时达到 50

°C,最高温度均达到 52 °C。而 B0 处理在第 5 d 时升到 41 °C,第 11 d 时升到最高温度 49 °C。生物质炭处理与对照相比,提前 3~5 d 进入高温期,显著加快了堆肥进程。

2.1.2 生物质炭对堆肥理化性质的影响

堆体 pH、EC、DOC、TC、TN 的变化见表 2。与堆肥初期相比, B0、B1、B2、B3 的 pH 分别增加 12.3%、5.7%、8.1%、6.3%。添加生物质炭能够相对降低堆体 pH 值增幅。试验后期,所有处理的 pH 值均保持在 9.0 以下,符合腐熟堆肥 pH 值应在 8.0~9.0 之间的标准,达到堆肥腐熟要求^[12]。在堆肥初期,堆体中可溶性盐分含量较高,经过高温腐熟后各堆体的 EC 值均大幅下降,添加生物质炭处理的堆体与对照相比差异不显著。

堆肥初期,与对照相比添加生物质炭堆体中 DOC 含量显著降低 23.3%~52.0%,而且随添加比例的提高,DOC 含量逐渐降低。在堆肥结束后添加生物质炭的堆体 DOC 比对照显著降低 16.9%~21.3%,而各生物质炭处理间没有显著差异。添加生物质炭后,堆体的

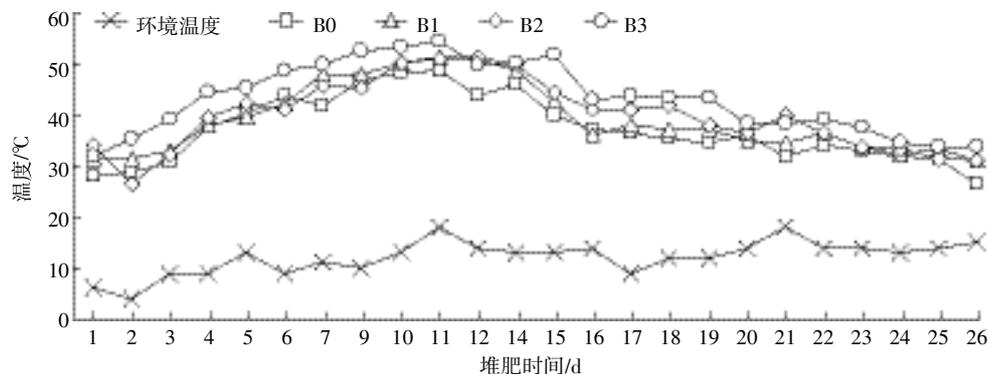


图 1 猪粪堆肥腐熟过程中堆体温度的动态变化

Figure 1 Changes in temperature during swine manure composting process

表 2 堆肥理化性质

Table 2 Physical and chemical characters of the compost

处理		pH	EC/mS·cm ⁻¹	DOC/g·kg ⁻¹	TC/%	TN/%
初始值	B0	7.56 \pm 0.31b	5.22 \pm 1.02a	11.23 \pm 0.87a	37.96 \pm 0.79b	1.69 \pm 0.05a
	B1	8.03 \pm 0.35ab	5.79 \pm 1.43a	8.61 \pm 0.38b	37.70 \pm 1.01b	1.51 \pm 0.59a
	B2	8.17 \pm 0.08a	5.81 \pm 0.93a	5.75 \pm 0.82c	37.34 \pm 0.4b	1.41 \pm 0.06a
	B3	8.33 \pm 0.20a	5.83 \pm 1.70a	5.39 \pm 0.01c	40.35 \pm 2.01a	1.35 \pm 0.26a
最终值	B0	8.49 \pm 0.12b	2.71 \pm 0.07a	5.49 \pm 0.47a	36.96 \pm 2.21a	1.46 \pm 0.32a
	B1	8.49 \pm 0.09b	2.63 \pm 0.06a	4.23 \pm 0.19b	37.14 \pm 0.41a	1.32 \pm 0.26a
	B2	8.84 \pm 0.16a	2.66 \pm 0.33a	3.77 \pm 0.33b	37.87 \pm 0.69a	1.28 \pm 0.15a
	B3	8.86 \pm 0.14a	2.79 \pm 0.22a	4.56 \pm 0.63b	37.87 \pm 0.65a	1.17 \pm 0.11a

注:不同处理同一列相同字母表示处理间差异未达到显著水平($P>0.05$)。下同。

Note: Values with the same letter means no significant difference among different treatments($P>0.05$). The same below.

TN 含量也有所降低, 但差异不显著, 与初始值相比, B0、B1、B2、B3 分别减少 13.6%、12.6%、9.9%、13.3%。

2.2 生物质炭对堆肥过程中氮素转化的影响

2.2.1 生物质炭对堆肥 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量的影响

堆肥过程中堆体 NH₄⁺-N 含量的动态变化见图 2。B1、B2、B3 处理堆体的 NH₄⁺-N 含量呈上升趋势并在第 3 d 达到最高, 分别为 1 226.2、1 396.5、996.0 mg·kg⁻¹, 随后迅速下降, 最终趋于稳定。而 B0 处理 NH₄⁺-N 含量在堆肥的前一周内持续上升, 在第 7~11 d 保持在 1 546.8~1 610.0 mg·kg⁻¹ 范围内, 随后逐渐下降并趋于稳定。在达到最高点时 B0、B1、B2、B3 处

理的 NH₄⁺-N 含量分别比初始值提高 48.6%、41.8%、51.9%、6.6%, 生物质炭能够促进堆体 NH₄⁺-N 在堆肥中期的转化。

在堆体升温期, 堆体的 NO₃⁻-N 含量没有显著变化。添加生物质炭处理在第 7 d 后堆体 NO₃⁻-N 含量开始迅速上升, 在第 20 d 后到达最高点, 而对照处理的堆体在第 10 d 以后才开始升高, 同样在第 20 d 后达到最高点, 添加生物质炭能够显著增加高温期堆体 NO₃⁻-N 含量。

2.2.2 生物质炭对堆肥过程中氨挥发的影响

图 3 为堆肥过程中各处理堆体的氨挥发速率动

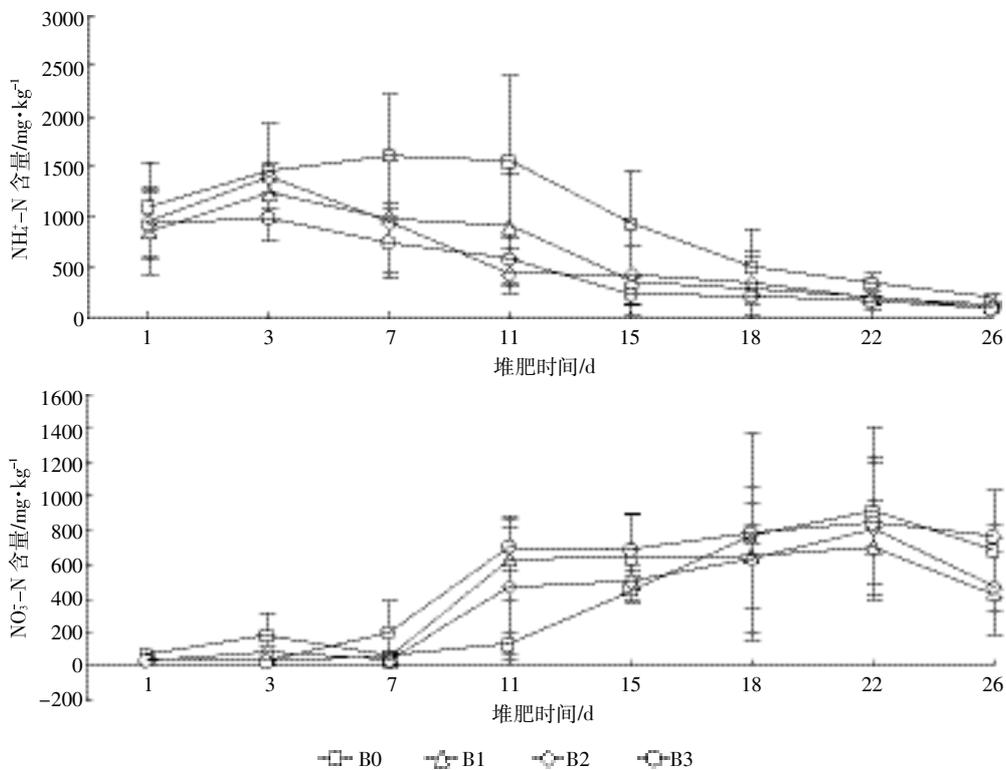


图 2 猪粪堆肥腐熟过程中堆体 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的变化

Figure 2 Changes in ammonium nitrogen content and nitrogen content during swine manure composting process

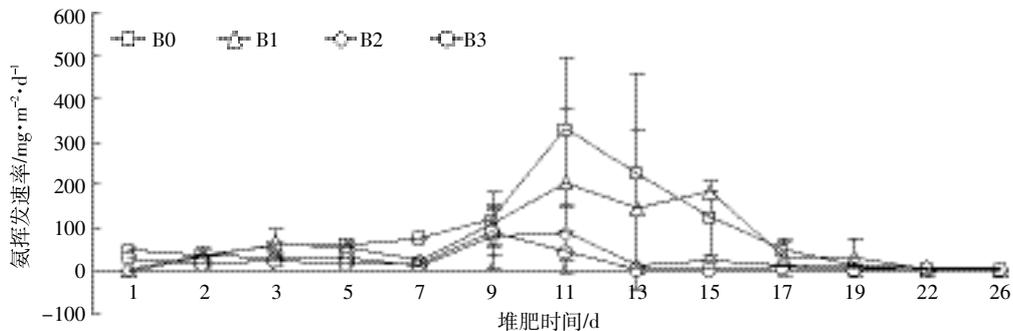


图 3 猪粪堆肥腐熟过程中堆体氨挥发速率的变化

Figure 3 Changes in ammonia volatilization rate during swine manure composting process

表3 猪粪堆肥腐熟过程中堆体氨挥发累计量

Table 3 Total emission of NH₃ in different swine manure composting

处理	堆肥各时期氨挥发量/g·m ⁻²			氨挥发累计量/g·m ⁻²	氨挥发累计量占TN的比例/%
	升温期	高温期	腐熟期		
B0	128.85±8.72a	653.13±173.34a	110.32±75.45a	892.32±229.29a	26.82±6.89a
B1	126.61±46.27a	673.07±223.47a	6.64±2.79b	686.11±473.22ab	21.65±14.93ab
B2	62.41±20.15b	208.49±138.95ab	9.45±6.32b	280.35±141.20b	7.37±3.71b
B3	39.32±4.06b	148.05±88.91b	4.99±5.45b	192.37±95.43b	5.47±2.71b

态变化,堆肥前期氨挥发速率较小,随着堆体温度的升高,氨挥发速率逐渐加快,在高温期氨挥发速率达到最大,在腐熟阶段氨挥发速率逐渐降低。从表3可看出,与对照相比,B2、B3能够显著降低升温期和高温期的氨挥发量,而B1处理影响不显著。与对照相比,B1、B2、B3处理氨挥发累计量分别减少23.1%、68.6%、78.4%,三个生物质炭处理的氨挥发累计量占全氮的比例分别比对照减少19.3%、72.5%、79.6%(表3)。

2.3 生物质炭对堆肥过程中温室气体排放的影响

堆肥过程中堆体CH₄、N₂O、CO₂排放量的动态变化见图4。在堆肥前10d,B0堆体CH₄排放速率显著高于生物质炭处理,生物质炭处理呈现先下降后上升的趋势,所有处理均在第15d到达最高。从表4可看出,在升温期和高温期生物质炭处理的CH₄排放量平均较对照显著降低60.4%和27.9%。堆体的N₂O排放速率均呈现先上升后下降的趋势,生物质炭处理N₂O的排放量在升温期、中温期和高温期分别较对照显著降低84.3%~90.3%、47.6%~66.3%和28.9%~64.0%,但加炭处理间无差异。添加生物质炭在升温期能够显著降低堆肥CO₂排放量,在高温期与腐熟期B2处理能够显著降低CO₂排放量,B1、B3处理效果不显著。从温室气体排放总量来看,添加生物质炭可显著降低CH₄和N₂O排放总量的16.3%~23.5%和50.2%~70.7%,而CO₂的排放总量仅在B2处理中显著降低。

3 讨论

3.1 生物质炭对堆肥腐熟过程的影响

对好氧堆肥而言,堆体温度是判定堆肥腐熟程度的重要因素^[13]。本研究结果表明,生物质炭处理能够显著增加堆体的温度,加快堆体升温,与对照相比提前3~5d进入高温期,缩短了堆肥周期(图1)。李丽劼等^[8]研究发现,在猪粪堆肥过程中添加适量的竹炭有利于提高堆体温度,加快堆肥腐熟进程。pH值是堆肥腐熟的重要指标之一,能够影响堆体内微生物的生长繁殖,在一定程度上反映堆肥腐熟进程。本试验结果

表明,在猪粪堆肥过程中堆体的pH值会显著增加,而生物质炭能够降低堆置过程中pH值的增加幅度。这可能是添加生物质炭后因其具有较强的吸附能力,能够有效地吸附堆体中的NH₄⁺-N,抑制NH₄⁺-N的溶解,阻止氢氧根离子的形成,从而有效地降低堆体pH值增加幅度^[14]。堆体的EC值作为植物生长的限制因素,是衡量堆肥能否农用的重要指标,添加生物质炭对堆体EC值没有显著影响,腐熟后堆体EC值均低于3mS·cm⁻¹,一般地,堆体EC值不高于4.0mS·cm⁻¹时,均不会对植物生长造成毒害或抑制效应^[15]。

3.2 生物质炭对堆肥过程中氮素转化的影响

畜禽粪便堆肥过程中氮素转化的作用主要包括氨化作用、硝化作用、反硝化作用和生物吸收固持作用^[16]。在堆肥过程中氮素有一定的损失,主要是由于有机氮的矿化和持续性氨的挥发以及硝态氮的反硝化,造成堆体氮素50%~68%的损失^[17]。本试验结果表明,添加15%生物质炭处理能够显著提高NH₄⁺-N在堆肥初期的积累,同时促进NH₄⁺-N在中后期的转化,显著增加高温期及腐熟期堆体NO₃⁻-N含量(图2),与陶金沙等^[18]研究结果一致。生物质炭能够调节堆体的C/N、改善堆体的通气供氧能力,有利于促进堆体中的NH₄⁺-N转化为NO₃⁻-N;生物质炭的多孔性和巨大的比表面积能够为微生物的生长繁殖提供附着点,提高微生物活性,促进堆肥前期微生物分解有机碳、氮化合物^[19]。黄向东等^[20]在猪粪堆肥过程中添加竹炭增加了堆肥NH₄⁺-N、NO₃⁻-N及TN含量,使氮素固定率提高28.3%~65.4%。Hua等^[21]和Prost等^[22]研究发现,生物质炭表面含有丰富的羧基和酚羟基等酸性官能团,这些酸性官能团能通过离子键与堆体中的NH₄⁺紧密结合,并促使NH₄⁺-N向其他氮素形式转变。

堆肥过程中氮素损失的主要途径是NH₄⁺-N以NH₃形式挥发,氨挥发强度受堆体温度、NH₄⁺-N浓度、pH值等多因素的综合影响^[23]。本研究表明,添加生物质炭可显著降低堆体氨挥发速率及氨挥发累计量(图3)。Steiner等^[24]发现在鸡粪堆肥过程中加入20%的生

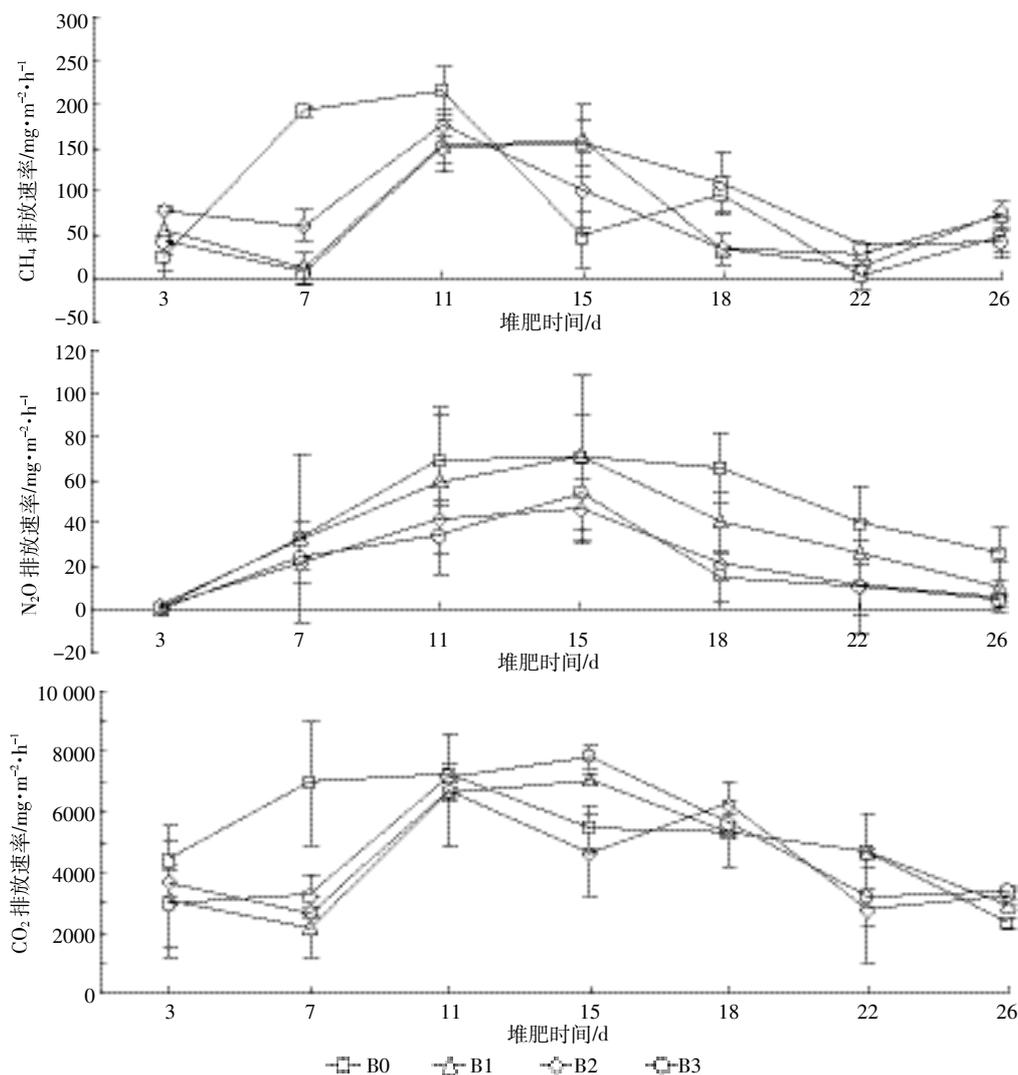


图4 猪粪堆肥腐熟过程堆体表面 CH₄、N₂O、CO₂ 排放率的变化

Figure 4 Changes in emission rate of nitrous oxide, methane, carbon dioxide during swine manure composting process

表4 堆肥过程中不同时期的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放量及其排放总量

Table 4 Total emission of CO₂, CH₄ and N₂O in different swine manure composting treatment

处理	升温期/g·m ⁻²			高温期/g·m ⁻²			腐熟期/g·m ⁻²			排放总量/g·m ⁻²			N ₂ O 排放总量占 TN 的比例/%
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	
B0	10.30±0.34a	10.50±3.02a	543.76±23.99a	32.08±1.62a	20.53±4.38a	1 291.41±27.63a	14.12±4.42b	14.64±2.59a	1 185.17±123.86ab	56.5±6.09a	45.75±8.02a	3 020.34±134.16a	1.37±0.24a
B1	3.30±1.37c	1.59±1.34b	253.59±46.24b	22.94±2.12b	10.76±1.7b	1 082.81±40.96ab	17.05±1.65ab	10.41±2.2ab	1 328.33±96.58a	43.2±1.82b	22.77±1.88b	2 664.72±149.77ab	0.71±0.05b
B2	6.68±0.64b	1.03±0.15b	302.62±22.44b	24.54±1.01b	7.22±1.68b	995.51±248.68b	12.97±3.16b	5.41±2.54b	1 092.11±129.16b	44.1±3.83b	13.66±3.84b	2 390.25±374.26b	0.35±0.10c
B3	2.25±0.68c	1.20±0.62b	292.21±96.61b	21.93±1.81b	6.92±1.76b	1 216.72±82.44ab	23.18±4.31a	5.26±4.06b	1 275.59±38.88ab	47.3±5.27b	13.39±5.28b	2 784.52±209.64ab	0.38±0.15c

物质炭 NH₃ 排放量显著减少 64%。生物炭的特殊理化性质能直接吸附 NH₄⁺-N 和 NH₃ 等氮素物质,刘宁等^[25]通过分析好氧堆肥过程第 1、7、14、28 d 的代表性生物炭扫描电镜图像发现,随着堆肥的进行,其内部

吸附的小颗粒逐渐增多并凝聚成较大的颗粒单元。这可能是生物炭能够减少堆肥中氮素损失的原因之一。此外,徐路魏等^[26]研究发现,生物炭能够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,从而降低了堆体的氨挥发损失。

3.3 生物质炭对堆肥过程中温室气体减排的影响

研究表明,堆肥过程中0.02%~9.9%的初始氮会以 N_2O 的形式挥发^[27-29]。本试验结果表明,添加生物质炭处理能够显著降低堆体 N_2O 的排放, N_2O 排放总量仅占TN的0.4%~1.4%(表4)。Wang^[30]等运用定量PCR研究了猪粪堆肥过程中 N_2O 的产生作用机理,结果显示,生物质炭的输入可减少 N_2O 氧化菌的数量,同时增加 N_2O 还原菌的数量,从而达到 N_2O 减排的效果。程效义等^[31]研究表明,生物质炭降低堆肥过程中 N_2O 排放的机理可能与其影响堆体中硝化与反硝化作用密切相关,生物质炭的添加可通过改变堆体温度、含氧量、pH、含水率和氮素含量等环境因子影响氮素循环相关的功能微生物,进而影响堆体中硝化与反硝化作用^[32]。

堆肥物料局部厌氧导致 CH_4 产生, CH_4 挥发量可达总有机碳(TOC)的0.1%~12.6%^[24]。本研究表明,添加生物质炭显著降低堆体 CH_4 的排放量(表4)。这可能是因为甲烷菌主要以活性有机碳为底物,添加生物质炭能够显著减低堆体中可溶性有机碳的含量,从而减少了微生物可利用性碳。贾永兴^[33]的研究认为由于生物质炭具有极高的孔隙度使得堆体充分通气,从而优化堆体氧气供应和分配,导致产甲烷菌的活动受限制。畜禽粪便堆肥过程中的 CO_2 排放是有机物被微生物分解而产生的,生物质炭能够通过影响堆体内微生物的群落结构^[34]和活性而影响堆体 CO_2 的排放。本研究中添加10%生物质炭显著降低堆体 CO_2 的排放,而5%、15%添加量没有明显的影响。这方面的影响机制有待于进一步深入研究。

4 结论

(1) 生物质炭能够显著增加堆体的温度,缩短堆肥周期,其中添加15%生物质炭处理的堆体比其他处理提前3d到达高温期。

(2) 生物质炭能减少堆肥过程中 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 的损失,尤其是在高温期,生物质炭能够显著增加堆体的 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 含量。添加10%、15%生物质炭能显著减少堆肥过程中的氨挥发。生物质炭能够显著降低堆肥过程中氮素损失。

(3) 对于堆肥过程中温室气体排放的影响,添加生物质炭能够显著减低 CH_4 与 N_2O 排放量,添加10%生物质炭可显著减少 CO_2 排放总量,而5%、15%添加量效果不显著。由此可见,添加15%的生物质炭

是降低堆肥过程中的氮素损失、减少温室气体排放的有效措施。

参考文献:

- [1] 王煌平,张青,李昱,等. 热解温度对畜禽粪便生物炭产率及理化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11):2208-2214.
WANG Huang-ping, ZHANG Qing LI Yu, et al. Effects of pyrolysis temperature on yield and physicochemical characteristics of biochar from animal manures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2208-2214.
- [2] 李铁民,马溪平,刘宏生. 环境微生物资源原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:8-11.
LI Tie-min, MA Xi-ping, LIU Hong-sheng. Principle and application of environmental microbial resources[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:8-11.
- [3] Tam N F Y, 唐运平. 两种工业用细菌制品对猪废弃物圈内处理系统中营养物转化的影响[J]. 农业环境与发展, 1991, 8(4):39-41.
Tam N F Y, TANG Yun-ping. The effect of two kinds of industrial bacterial products on the transformation of nutrients in the pig waste treatment system[J]. *Agricultural Environment and Development*, 1991, 8(4):39-41.
- [4] 钟佳. 污泥/猪粪堆肥及其农田利用全过程的温室气体与氨气排放特征研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
ZHONG Jia. Emission characteristics of greenhouse gas and ammonia from the full process of sludge/swine manure composting and land application of the compost[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [5] El Kader N A, Robin P, Paillat J M, et al. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14):2619-2628.
- [6] Szanto G L, Hamelers H V M, Rulkens W H, et al. NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14):2659-2670.
- [7] Van Zwieten 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*, 2010, 327(1/2):235-246.
- [8] 李丽劼. 竹炭的添加对猪粪堆肥过程氮素持留与温室气体减排的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
LI Li-jie. Effects of bamboo charcoal on nitrogen conservation and greenhouse gas emissions reduction during swine manure composting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [9] Chowdhury M A, de Neergaard A, Jensen L S. Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 97:16-25.
- [10] 李冰,王昌全,江连强,等. 有机辅料对猪粪堆肥中氨气挥发的抑制效应及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):987-993.
LI Bing, WANG Chang-quan, JIANG Lian-qiang, et al. Inhibitory effect of auxiliary organic materials on ammonia volatilization in composting and the influencing factors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5):987-993.
- [11] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O)排放研究

- [D]. 南京:南京农业大学, 2005.
ZOU Jian-wen. A study on greenhouse gas (CO_2 , CH_4 and N_2O) emissions from rice-winter wheat rotations in Southeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005.
- [12] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2):98-103.
LI Yan-xia, WANG Min-jian, WANG Ju-si. The maturity indexes and standards of organic solid waste composting[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(2):98-103.
- [13] 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 Guo-xue, LI Yu-chun, LI Yan-fu. Advance on composting of solid waste and utilization of additives[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):252-256.
- [14] 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]. 成都: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]. Chengdu: Southwest University, 2013.
- [15] Zhang Y, He Y. Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(16):2024-2031.
- [16] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 畜禽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 its control during livestock manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):247-254.
- [17] Malińska K, Zabochnicka-Swiatek M, Dach J. Effects of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71:474-478.
- [18] 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):1233-1240.
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):1233-1240.
- [19] 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.
- [20] 黄向东, 薛冬. 添加竹炭对猪粪堆肥过程中升温脱水及氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4):1057-1062.
HUANG Xiang-dong, XUE Dong. Effects of bamboo biochar addition on temperature rising, dehydration and nitrogen loss during pig manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4):1057-1062.
- [21] Hua L, Wu W X, Liu Y X, et al. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(1):1-9.
- [22] Prost K, Borchard N, Siemens J, et al. Biochar effected by composting with farmyard manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(1):164-172.
- [23] 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.
- [24] Steiner C, Das K C, Melear N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. *Journal of Environment Quality*, 2010, 39(4):1236-1242.
- [25] 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(12):233-239.
LIU Ning, ZHOU Jia-liang, MA Shuang-shuang, et al. Impacts of biochar on major forms contents and conservation mechanism of nitrogen during aerobic composting of chicken manure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016(12):233-239.
- [26] 徐路魏. 蔬菜废弃物堆肥化过程中碳氮转化规律[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
XU Lu-wei. Carbon and nitrogen transformation during vegetable waste composting[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [27] Beckfriis B, Smars S, Jonsson H, et al. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 78(4):423-430.
- [28] Sommer S G, Oslash M, Ller B H, et al. Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production: Effect of straw content[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2000, 134:327-335.
- [29] Szanto G L, Hamelers H V, Rulkens W H, et al. NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure. [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14):2659-2670.
- [30] Wang C, Lu H, Dong D, et al. Insight into the effects of biochar on manure composting: Evidence supporting the relationship between N_2O emission and denitrifying community[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13):7341-7349.
- [31] 程效义, 刘晓琳, 孟军, 等. 生物炭对棕壤 NH_3 挥发、 N_2O 排放及氮肥利用效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):801-807.
CHENG Xiao-yi, LIU Xiao-lin, MENG Jun, et al. Effects of biochar on NH_3 volatilization, N_2O emission and nitrogen fertilizer use efficiency in brown soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):801-807.
- [32] 王成. 堆肥过程 N_2O 减排控制与木质纤维素降解微生物学机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
WANG Cheng. Nitrous oxide mitigation and lignocellulose degradation in manure composting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [33] 贾兴永. 生物炭及翻堆频率对鸡粪堆肥过程中温室气体排放的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
JIA Xing-yong. The effect of biochar addition and turning frequency on greenhouse gas emissions in chicken manure composting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [34] Jindo K, Sanchez-Monedero M A, Hernandez T, et al. Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 416:476-481.