

畜禽粪便快速发酵过程中的氮素转化及损失

张雪辰, 王旭东*

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:采用鸡粪、猪粪、菌糠、沼渣等材料按一定比例调配为混合基质,在添加或不添加生物发酵剂的条件下进行为期 30 d 的堆肥发酵试验,研究两种处理方式下堆肥的氮素转化特征以及温度和有机碳变化。结果表明,添加发酵剂可以提高堆肥温度,延长高温阶段,促进有机碳分解,降低 C/N 比,在堆腐的前期(前 9 d)有利于有机氮向铵态氮转化,中后期(9 d 以后)有利于铵态氮向硝态氮转化。与无发酵剂处理相比,添加发酵剂的堆肥腐熟提前 9 d 左右。添加发酵剂促进了蛋白质的水解,前期有利于酸水解氮(THN)的形成,提高其中氨基酸氮(AAN)和酰胺态氮(AN)等化合物的含量,且在加速复杂有机氮化合物向有效化态转化的同时,并没有造成氮素过多损失。

关键词:畜禽粪便;堆腐;氮素转化;发酵剂

中图分类号:S141.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)03-0458-07 **doi:**10.11654/jaes.2014.03.008

Nitrogen Transformation and Loss in Livestock and Poultry Manure Mixture During Rapid Composting Process

ZHANG Xue-chen, WANG Xu-dong*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Nitrogen losses in organic wastes during composting greatly reduce the efficiency of compost fertilizers. A 30 days composting experiment was conducted to study nitrogen transformation and loss during rapid composting processes with or without adding a bio-fermenting agent using chicken manure, pig manure, fungus chaff, and biogas residue as mixed media. Addition of bio-fermenting agent raised temperature, extended the period of high-temperature, promoted the decomposition of organic carbon and reduced the C/N rates. Transformation of organic nitrogen to ammonium (NH_4^+-N) (ammonification process) was stimulated at the early stage (first 9 days), and nitrification process (NH_4^+-N to NO_3^--N) was also facilitated at the late stage (9 days later). Adding fermenting agent could shorten the compost maturity by about 9 days compared with no fermenting agent. The hydrolysis of the proteins was promoted by fermenting agent, resulting in an increase in acid hydrolysis nitrogen (THN) during the early composting stage. Furthermore, amino acid nitrogen (AAN) and amide nitrogen (AN) from THN were raised. Application of fermenting agent enhanced transformation of organic nitrogen to more available forms, but it did not cause nitrogen loss obviously in the whole process.

Keywords: livestock and poultry manure; composting; nitrogen transformation; fermenting agent

随着我国集约化畜禽养殖业的迅速崛起,畜禽粪便大量增加,处理或处置不当所产生的环境污染问题

引起社会普遍关注^[1],采用物理、化学、生物等技术,对粪便进行工厂化快速处理受到越来越多的重视和推广应用^[2]。畜禽粪便经快速堆腐和无害化处理后生产有机肥,施入农田系统,实现废弃物的农业循环利用。畜禽粪便中含有大量的有机质,而新鲜的有机质强烈分解会产生大量具有植物毒性的有机酸类物质,影响土壤的理化性质以及作物生长。同时在堆肥过程中,有机氮素在微生物的作用下最终转为无机氮,其中会

收稿日期:2013-07-24

基金项目:十二五科技支撑资助课题-黄土高原果牧复合循环技术集成与示范(2012BAD14B11);陕西省科技统筹创新工程计划课题(2011KTDZ02-01-04)

作者简介:张雪辰(1989—),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为土壤化学。E-mail: xuechen_89@hotmail.com

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

形成一些氨基酸、酰胺等中间产物,这种转化过程包括水解过程、氨化、硝化、反硝化、挥发(如 N_2 、 NH_3 、 N_2O)和生物吸收固定等。氮素的转化既关系到堆肥产品的腐熟度、臭气释放,也关系到氮素损失和堆肥产品的肥效。堆肥化处理过程中氮素损失率高达77%,其中铵态氮的挥发和硝态氮的反硝化造成的气态氮素损失达43%~70%^[3,9]。探寻既能促进快速腐熟,又不引起养分损失的方法显得非常迫切。人为加入高效生物菌剂可以调节菌群结构、提高微生物活性,从而提高堆肥效率、缩短发酵腐解时间、提高堆肥产品的质量。以往的研究发现,采用生物菌剂对畜禽粪便进行发酵和无害化处理时,具有发酵温度上升快和腐熟快的特点^[4-6]。在有机成分快速分解的过程中,是否存在氮素大量损失是人们关注的问题,有些研究表明,堆肥过程中添加微生物菌剂对养分保存(全N、全P、全K)以及减少氮素损失有一定的作用^[6-7]。前期的文献往往以腐解过程无机氮变化的研究较多^[8-10],对有机氮转化的研究较少,且研究也很不系统,而这恰恰是探明氮素转化的关键环节。为此,该文通过对有机氮进行分组,研究了在添加或不添加发酵剂下畜禽粪便堆腐过程中氮的转化规律,为畜禽粪便的快速无害化处理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料及堆肥过程

堆肥所用原料的比例为菌糠:沼渣:鸡粪:猪粪:矿粉=15:5:5:5:1(体积比),矿粉采用的是凹凸棒石。将各个原料按比例混合均匀后分别在拌有发酵剂和不拌发酵剂的情况下移入发酵池内开始发酵。发酵池宽9 m,长90 m,高度为1.8 m,混合物料在发酵池中的堆积厚度为1.2 m,采用链板式抛翻机每天抛翻一次(在水润德沼气有限公司有机肥厂进行)。每次物料向前平移3 m,30 d内物料在发酵池中发酵结束。所用发酵剂内含中温分解菌(真菌、细菌)和高温分解菌(细菌、放线菌),有效菌数 $\geq 10^8$ cfu·g⁻¹,菌剂的添加比例为0.5%(质量比)。堆肥物料的基本性质见表1。

1.2 样品采集

结合物料在发酵池抛翻过程中的平移距离,分别在物料发酵的第3、6、9、12、15、18、21、25、30 d采样,每个采样点采集堆肥的上中下3个层次进行混合(作为一个样),每个发酵时段采集2个点作为重复。部分样品收集于塑料袋中密封,4℃冷藏保存待测,另一部分样品摊开自然风干后粉碎过0.25 mm筛待测。同

表1 堆肥物料的物理化学性质

Table 1 Physical and chemical properties of composting materials

指标	猪粪	鸡粪	菌糠	沼渣
pH	7.91	7.16	6.20	8.32
ES/ $\mu S \cdot cm^{-1}$	4860	10 440	4650	2980
全氮/g·kg ⁻¹	27.82	20.70	23.74	17.19
全磷/g·kg ⁻¹	19.92	16.86	6.32	5.30
全钾/g·kg ⁻¹	15.73	26.20	12.18	7.87
有机质/g·kg ⁻¹	320.25	250.12	350.31	480.27

时采集混合物料还没发酵的瞬时样(代表发酵0 d)。

1.3 测定项目与方法

全氮采用凯氏定氮法;有机氮的分组测定采用 Bremner^[11]方法,即将有机氮分为酸水解氮和非酸水解氮,其中酸水解氮中又划分为氨基酸态氮、酰胺态氮等;铵态氮、硝态氮采用氯化钾浸提法^[12];灰分采用常压二步法^[12];有机碳采用重铬酸钾-外加热法^[12]。

1.4 计算氮素损失率

根据腐熟过程灰分无损失的原理,推导出氮素损失率(N_L)的计算公式为: $N_L=1-H_0/H_n \cdot N_n/N_0$

式中: N_L 表示氮素损失率; 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; N_n 表示不同采样时期全氮含量; N_0 表示腐解开始时全氮含量。

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中温度变化

堆肥过程要经历3个阶段即升温阶段、高温阶段、降温阶段,其中高温阶段是最为重要的环节。从图1中可以看出添加发酵剂的处理,从反应开始迅速升温,到第9 d达到最高温度(73℃),随后缓慢下降,腐解到第30 d时堆体温度稳定在33℃左右。未添加发酵剂的处理,在第14 d时达到最高温度(63℃),比添

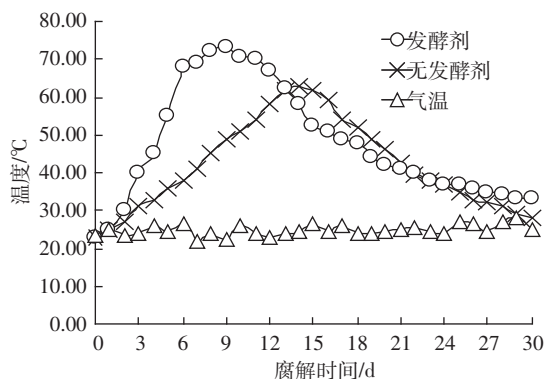


图1 腐解过程中温度变化

Figure 1 Changes of temperature during composting

加发酵剂的处理推迟了 5 d, 且最高温度低了 10 ℃; 腐解到第 30 d 时, 堆体温度为 28 ℃。因此, 添加发酵剂可以快速提高堆肥温度, 提高堆肥的最高温度, 延长堆肥的高温期, 使有机物料充分反应, 促进腐熟。

2.2 堆肥过程氮素变化

2.2.1 全氮含量变化

在堆肥过程中, 两个处理的全氮呈现出先下降后升高的趋势(图 2), 这与王秀娟等^[13]的研究报道一致。添加发酵剂处理的全氮含量在 0~15 d 下降较快, 15~30 d 略有回升; 未添加发酵剂处理的全氮含量在 0~18 d 下降较快, 18~30 d 略有回升。腐解前期全氮下降的主要原因是有机氮的矿化分解和氨气的挥发, 后期由于有机氮的减少, 氮素的生物固定作用等, 使得全氮含量略有回升。总体来看两个处理全氮含量分别降低了 17.73% 和 21.67%。方差分析显示, 在 30 d 腐解结束时, 添加发酵剂处理的全氮含量与初始全氮含量间的差异不显著, 而无发酵剂处理的全氮含量与初始全氮含量间的差异达到显著水平; 添加发酵剂处理与无发酵剂处理相比, 全氮略高, 但差异不显著。

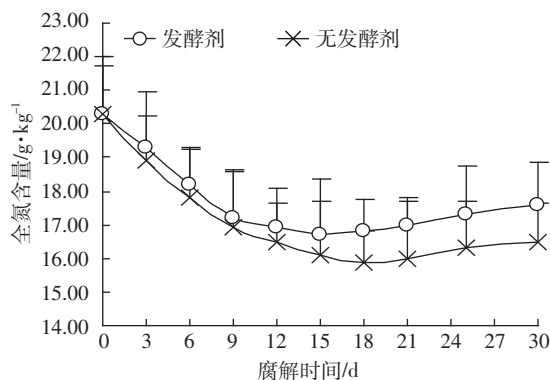


图 2 腐解过程中全氮含量变化

Figure 2 Changes of total N during composting

2.2.2 有机碳及 C/N 比的变化

在整个堆肥过程中, 随着腐解进行有机碳呈下降趋势(图 3), 这与其他研究者的报道吻合^[14]。添加发酵剂的处理, 在堆腐的前 12 d, 有机碳下降较迅速(下降了 18.99%); 无发酵剂的处理, 有机碳含量下降较为缓慢(下降了 14.76%)。至腐解结束时(30 d), 添加发酵剂处理的 TOC 含量降低了 29.22%, 未添加发酵剂的处理降低了 27.44%。总体来看发酵剂中含有中温菌和高温菌, 有助于提高堆体温度, 加速物料反应, 促进了有机碳的矿化分解, 腐解 30 d 时, 腐解产物的有机碳含量比无发酵剂的处理低 2.45%。

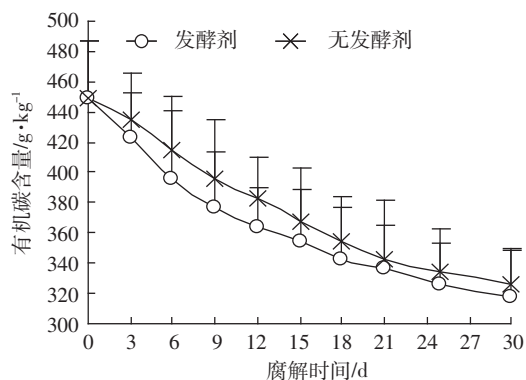


图 3 腐解过程中有机碳变化

Figure 3 Changes of TOC during composting

两个处理在堆肥过程中的 C/N 比整体呈下降趋势(图 4)。腐解开始时(0~9 d) C/N 比较为稳定, 变化不大, 第 9 d 后开始下降, 添加发酵剂的处理下降得更为明显, 这是由于添加发酵剂的处理有机碳分解剧烈的缘故。一般认为堆肥产品 C/N 比小于 20 即可看作基本腐熟。本研究发现, 添加发酵剂的处理在 21 d 时 C/N 比小于 20, 无发酵剂的处理在 30 d 时 C/N 比小于 20。因此从 C/N 比看, 添加发酵剂的处理促进了堆肥的腐熟。

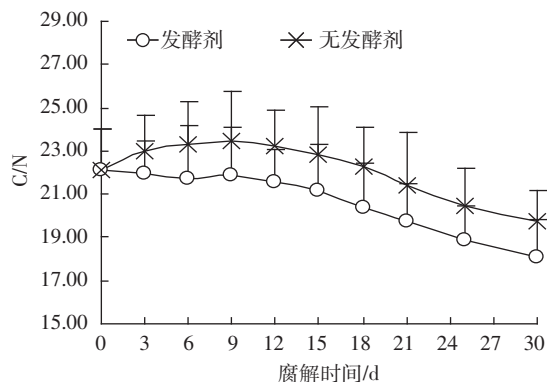


图 4 腐解过程中 C/N 变化

Figure 4 Changes of C/N during composting

2.3 堆肥过程中无机氮的变化趋势

2.3.1 铵态氮的变化趋势

堆肥过程铵态氮的变化显示(图 5a), 添加发酵剂的处理从堆肥开始到第 6 d, 铵态氮含量逐渐上升达到最高点, 第 6 d 至 21 d 期间铵态氮明显下降, 21 d 后趋于平缓, 含量几乎不变。无发酵剂的处理在前 12 d 铵态氮含量基本无变化, 然后逐渐降低。说明添加发酵剂加剧了前期有机氮的氨化作用, 从而产生了大量的铵态氮; 后期随着硝化作用的增强, 铵态氮转

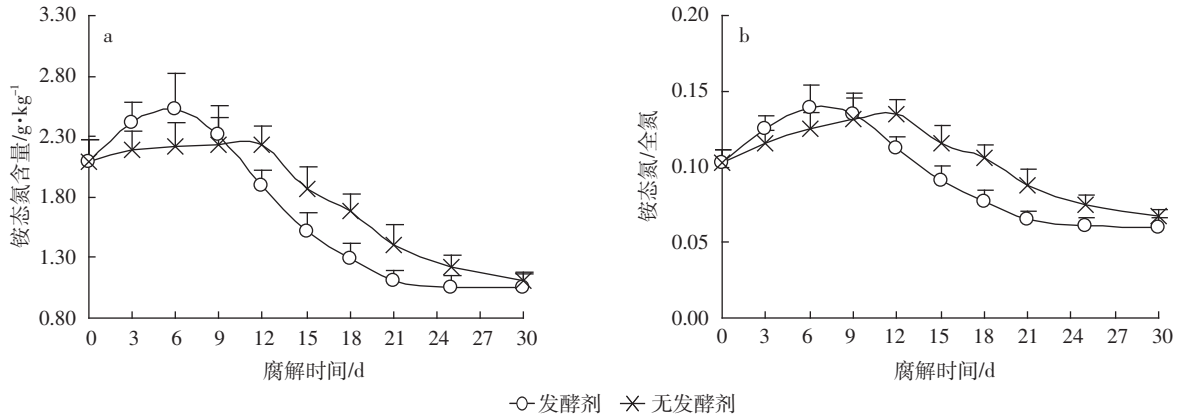


图5 腐解过程中铵态氮变化趋势

Figure 5 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ during composting

化为硝态氮以及部分铵态氮呈氨气挥发等,导致两个处理的铵态氮含量均下降。两个处理的铵态氮占全氮比例的变化趋势与其含量变化趋势相似(图5b),也呈现出先增加后下降的趋势。总体看来,堆腐9 d以后,添加发酵剂的处理,铵态氮含量比无发酵剂的处理低,说明添加发酵剂既加速了前期有机氮的氨化作用,又促进了中后期的硝化作用等。

2.3.2 硝态氮的变化趋势

随着堆肥的进行,2个处理的硝态氮含量先下降后升高,呈现相同的变化趋势(图6a)。添加发酵剂的处理硝态氮含量在第9 d前略低于无发酵剂处理。这是因为添加发酵剂后,前期微生物分解过程产生的生物热多,使得堆体温度较高,抑制硝化细菌的生长和硝化作用的进行^[15]。后期随着温度逐渐下降趋于平缓,硝化作用增加,导致硝态氮含量迅速升高。腐解9 d以后,添加发酵剂的处理,其硝态氮含量普遍高于无发酵剂的处理。

硝态氮占全氮比例的变化趋势与其含量的变化趋势一致,表现为先降低后升高(图6b)。与铵态氮所占比例相互印证,前期升温阶段,添加发酵剂能促进有机物分解产生铵态氮,对硝化作用有一定的抑制作用,后期随温度下降,又促进硝化作用。

2.3.3 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 的变化

堆肥过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的相对变化是堆肥腐熟的重要标志^[16],Bernal 等^[17]提出,当堆肥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的比值小于 0.16 时,表明堆肥已达腐熟。但也有一些不同的观点^[18],有研究者认为当 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N} \leq 0.5$ 时堆肥已达到腐熟。本试验的两个处理铵态氮与硝态氮的比例均呈现出先升高后下降的趋势(图7)。添加发酵剂的处理,在第9 d时 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 达到最大值,未添加发酵剂的处理则在第12 d达到最大。这与铵态氮的最高点和硝态氮的最低点的时间相符。添加发酵剂的处理在堆肥第21 d的 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比值为 0.43,达到腐熟标准(≤ 0.5),未添加发酵剂

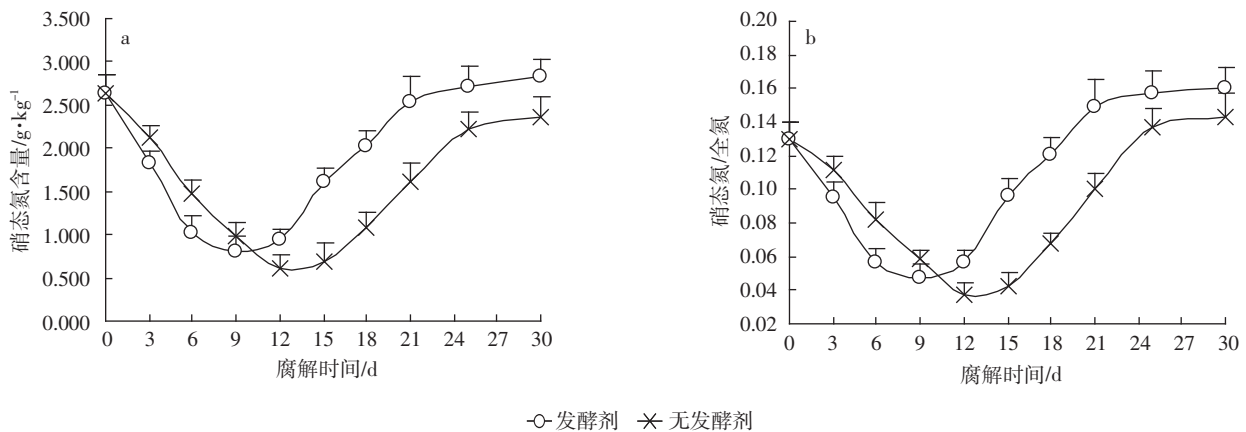


图6 腐解过程中硝态氮变化趋势

Figure 6 Changes of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ during composting

处理在第30 d其比值为0.46,达到腐熟标准。由此可见,添加发酵剂可以加速腐解物料的分解和氮素转化,促进快速腐熟。

2.4 堆肥过程中有机氮的变化

2.4.1 酸水解有机氮的变化

有机氮作为交换性铵和 NO_3^- -N的源和汇,长久以来一直受到研究者的极大关注^[19-21]。采用Bremner法将腐解物料中的有机氮分为酸解氮(THN)和非酸解氮(UTHN)两大部分。如图8所示,两个处理酸水解氮/全氮的比值变化为先升高后下降的趋势。添加发酵剂的处理在第9 d达到最大值,无发酵剂的处理在第15 d达到最大值。至腐解结束时,两个处理的酸水解氮/全氮比值都比发酵初期的有所降低,但两个处理之间差异不显著。

在酸解氮中含有氨基酸态氮(AAN)、酰胺态氮(AN)和非知态氮(HUN)等化合物,本研究主要对氨基酸态氮(AAN)和酰胺态氮(AN)进行测定分析。堆腐过程氨基酸态氮占酸水解氮的比值在前期有一定上升,后期则有所降低(图9)。与无发酵剂的处理相

比,添加发酵剂处理的氨基酸态氮/酸水解氮在第9 d上升到最大值,由初期占酸水解氮的21.36%上升到24.76%,然后下降,到堆腐结束时占酸水解氮的17.28%;未添加发酵剂的处理氨基酸态氮/酸解氮在第15 d时达到最大值(占24.16%),但总体变化较小。两个处理比较发现,堆腐至第12 d以前,添加发酵剂处理的氨基酸态氮/酸水解氮的比值高于无发酵剂的处理;第12 d以后则低于无发酵剂的处理,且两者差异达显著水平。说明添加发酵剂在后期促进氨基酸态氮向其他形态的转化。

在堆腐过程中,两个处理的酰胺态氮/酸水解氮比值前期有一定上升(图10),后期变化相对较小。添加发酵剂的处理,酰胺态氮/酸解氮比值在发酵第9 d左右达到最高值(占22.7%),未添加发酵剂的处理,在第15 d左右达到最大值(占20.6%)。总体看来,添加发酵剂的处理,酰胺态氮占酸解氮的比值相对较高。依据酸解氮中氨基酸态氮(AAN)和酰胺态氮(AN)的变化可看出,添加发酵剂促进了蛋白质以及非知态氮的水解,在一定堆腐时期有利于氨基酸态氮(AAN)和

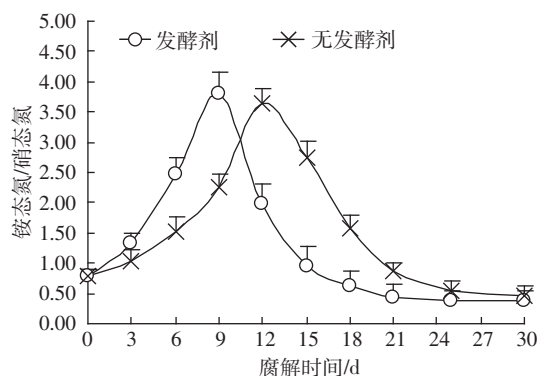


图7 腐解过程中铵态氮/硝态氮变化

Figure 7 Changes of NH_4^+ -N/ NO_3^- -N during composting

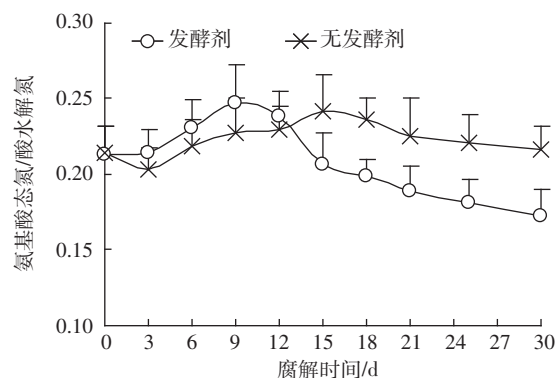


图9 腐解过程中氨基酸态氮/酸水解氮变化

Figure 9 Changes of AAN/THN during composting

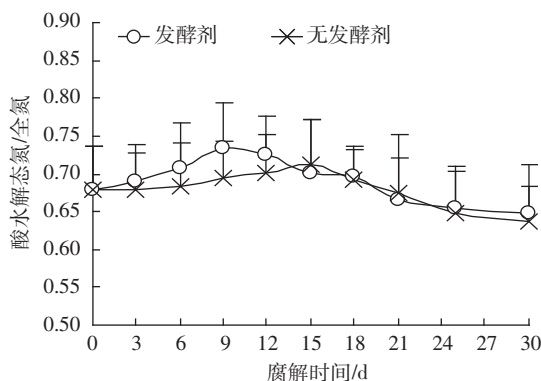


图8 腐解过程中酸水解态氮/全氮变化

Figure 8 Changes of THN/TN during composting

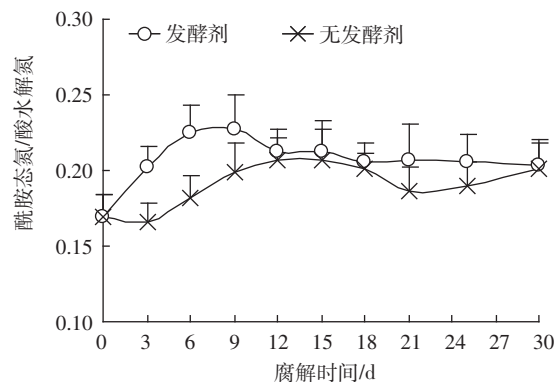


图10 腐解过程中酰胺态氮/酸水解氮变化

Figure 10 Changes of AN/THN during composting

酰胺态氮(AN)等有效性高的中间产物的形成。

2.4.2 非酸解有机氮的变化

两个处理的非酸解态氮占全氮的含量逐渐增加(图 11),和发酵原料相比,发酵至 30 d 差异均达到显著水平。两个处理之间相比,整个堆腐过程中,添加发酵剂处理的非酸解有机氮低于无发酵剂的处理,说明发酵剂处理有利于非酸解有机氮的进一步转化。

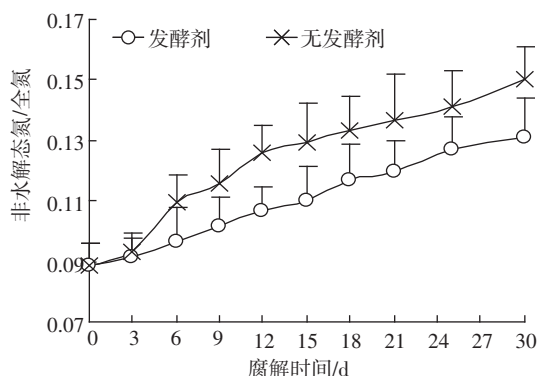


图 11 腐解过程中非水解态氮/全氮变化

Figure 11 Changes of UTHN/THN during composting

2.5 堆肥过程中氮素损失变化

两个处理随着堆肥时间延长,氮素损失率逐渐增加(图 12),堆肥结束时(腐解 30 d),2 个堆肥处理的氮素损失率均达 30%以上。这与曹喜涛等^[22]的研究结果类似。从不同时期氮素损失率来看,0~15 d 氮素损失较快,15~30 d 逐渐趋于平缓,经过 30 d 的堆制腐熟,添加发酵剂处理的氮素损失与未添加发酵剂处理相比,无显著差异。说明采用生物发酵处理,在促进腐熟和氮素转化的同时,并没有引起氮素的过度损失。这可能与添加发酵剂的处理酰胺态氮含量相对较高有关。

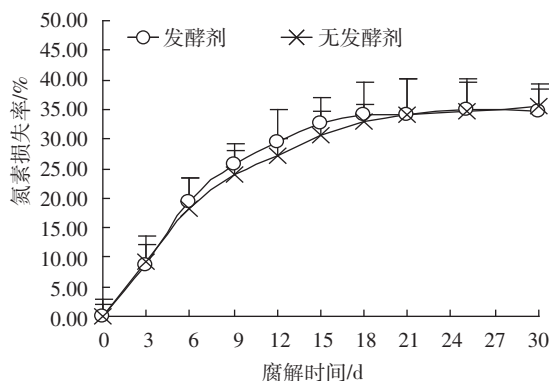


图 12 腐解过程中氮素损失率变化

Figure 12 Changes of nitrogen loss rate during composting

3 结论

(1)添加发酵剂可以延长堆肥过程中的高温阶段,加快腐解物料的腐解速度,使有机物料充分反应达到无害化和腐熟。

(2)有机碳和 C/N 随着腐解时间的延长,呈现下降趋势。添加发酵剂的处理下降趋势高于未添加发酵剂的处理,促进有机碳的矿化分解。

(3)添加发酵剂加速了铵态氮的转化,提高了后期硝态氮的含量,使后期 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 的比值快速达到腐熟指标(≤ 0.5)。

(4)在腐解前期添加发酵剂促进了有机氮的水解和氨基酸态氮、酰胺态氮的形成,降低了非酸解态氮的含量,在促进氮素有效化的同时,并没有引起氮素损失的增加。

参考文献:

- [1] 杨朝飞. 加强畜禽粪便污染防治迫在眉睫[J]. 环境保护, 2001(2): 32-35.
YANG Chao-fei. Pollution control of livestock breeding wastes is extremely urgent[J]. *Environmental Protection*, 2001(2): 32-35.
- [2] He X T, Traina S J, Logan T J. Reviews and analyses: Chemical properties of municipal solid waste composts[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21(31): 318-329.
- [3] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 42: 103-111.
- [4] 王小琳, 陈世昌, 袁国锋, 等. 促腐剂在鸡粪堆肥发酵中的应用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1210-1214.
WANG Xiao-lin, CHEN Shi-chang, YUAN Guo-feng, et al. Effects of transformation promoter on fermentation of chicken manure compost[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1210-1214.
- [5] 刘克峰, 刘悦秋, 雷增谱, 等. 不同微生物处理对猪粪堆肥质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 311-314.
LIU Ke-feng, LIU Yue-qiu, LEI Zeng-pu, et al. Effects of different microorganism consortiums on quality of composting pig-dung[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 311-314.
- [6] 王晓娟, 刘博文, 刘微, 等. 不同微生物促腐剂在鸡粪好氧堆肥中的应用研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 238-241.
WANG Xiao-juan, LIU Bo-wen, LIU Wei, et al. Effects of different microorganisms on chicken manure compost[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 238-241.
- [7] 王卫平, 朱凤香, 钱红, 等. 接种发酵菌剂和添加不同调理剂对猪粪发酵堆肥氮素变化的影响[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(5): 276-279.
WANG Wei-ping, ZHU Feng-xiang, QIAN-Hong, et al. Effect of inoculating microorganism agent and adding different attendant agents on changes of nitrogen during composting of pig manure[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(5): 276-279.

- [8] 杨国义, 夏钟文, 李芳柏, 等. 不同填充料对猪粪堆肥腐熟过程的影响[J]. 土壤肥料, 2003(3):29-33.
YANG Guo-yi, XIA Zhong-wen, LI Fang-bai, et al. Effect of different bulking agents on the maturity of pig manure composting[J]. *Soil and Fertilizers*, 2003(3):29-33.
- [9] 黄懿梅, 安韶山, 白红英, 等. 鸡粪与不同玉米秸秆高温堆肥中氮素的变化特征[J]. 西北农林科技大学学报, 2004, 32(11):53-57.
HUANG Yi-mei, AN Shao-shan, BAI Hong-ying, et al. Study on the nitrogen changes during the compost of chicken manure and different straws under higher temperature[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2004, 32(11):53-57.
- [10] 黄国锋, 钟流举, 张振钊, 等. 猪粪堆肥化处理过程中的氮素转化及腐熟度研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11):1459-1462.
HUANG Guo-feng, ZHONG Liu-ju, ZHANG Zhen-dian, et al. On nitrogen transformations and maturity during composting of pig manure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11):1459-1462.
- [11] 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.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. Third Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [13] 王秀娟, 关连珠, 颜 丽. 鸡粪堆腐过程中有机态氮形态的动态变化[J]. 中国农学通报, 2007, 23(2):302-306.
WANG Xiu-juan, GUAN Lian-zhu, YAN Li. Dynamic change of organic nitrogen forms during the chicken manure composting[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(2):302-306.
- [14] 贺 琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):169-173.
HE Qi, LI Guo-xue, ZHANG Ya-ning, et al. N loss and its characteristics during high temperature composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):169-173.
- [15] 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. Changes of various nitrogen-containing compounds in composting of chicken manure and indexes of maturity evaluation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1532-1537.
- [16] Garcia C. Study on water extract of sewage sludge composts[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37(3):399-408.
- [17] Bernal M P, Paredes C, Sanchez-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.
- [18] 张相锋, 王洪涛, 周辉宇, 等. 花卉秸秆和牛粪联合堆肥的中试研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(3):360-364.
ZHANG Xiang-feng, WANG Hong-tao, ZHOU Hui-yu, et al. Co-composting of flower waste and cattle manure in pilot scale[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(3):360-364.
- [19] 黄东迈, 朱培立. 有机氮各化学组分在土壤中转化[J]. 江苏农业学报, 1986, 2(2):17-25.
HUANG Dong-mai, ZHU Pei-li. Transformation of different organic nitrogen chemical composition in soil[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 1986, 2(2):17-25.
- [20] 汪景宽. 不同肥力棕壤各粒级微团聚体中氮素状况的研究: 迈向21世纪的土壤学[M]. 沈阳: 辽宁科学出版社, 1999:122-126.
WANG Jing-kuan. Study on nitrogen of various size microaggregates in different fertility brown: Soil science in the 21st century[M]. Shenyang: Liaoning Science Press, 1999:122-126.
- [21] Balabane M. Median-term transformation of organic N in a cultivated soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 1995, 46:497-505.
- [22] 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 Agricultural Sciences*, 2004, 20(2):106-110.