

高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律

贺 琪, 李国学, 张亚宁, 林小凤

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘 要: 利用鸡粪和粉碎小麦秸秆为原料进行了 C/N 比分别为 12.4、17.4、31.2、35.2 的自然通风静态堆肥对比试验, 定量化研究了堆肥过程中不同阶段各种形态氮素转化和氮素损失途径。结果表明, TOC 随着堆肥的进行逐渐降低, C/N 比越低堆肥 TOC 的降解越少; 低 C/N 比堆肥的全氮含量呈下降趋势, 高 C/N 比堆肥处理的含氮量呈上升趋势。堆肥过程中的 C/N 比均呈下降趋势, 其中 31.2_{C/N} 和 35.2_{C/N} 2 个处理的 C/N 比下降明显, 12.4_{C/N} 和 17.4_{C/N} 堆肥处理的 C/N 比变化不大。12.4_{C/N}、17.4_{C/N}、31.2_{C/N}、35.2_{C/N} 4 个堆肥处理的氮素损失率分别为 58.7%、60.2%、37.7%、23.3%。氮素损失的主要途径为铵态氮以氨气的形式挥发, 堆肥的 3~7 d 是氮素损失的主要时期。堆肥过程中氨态氮和有机氮的变化最大, 硝态氮变化较小, 主要在堆肥后期略有形成, 堆肥 28 d 时, 所有堆肥处理硝态氮含量占总氮含量变化为 0.58%~0.25%。堆肥 C/N 比越低, 有机氮损失越多, 氨态氮损失越小。高 C/N 比堆肥氨态氮不仅损失少, 而且向有机氮转化。

关键词: 高温堆肥; C/N 比; 氮素损失

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2005)01-0169-05

N Loss and Its Characteristics During High Temperature Composting

HE Qi, LI Guo-xue, ZHANG Ya-ning, LIN Xiao-feng

(College of Resource and Environment Science, China Agriculture University, Beijing 100094, China)

Abstract: Co-composting tests with C/N 12.4, 17.4, 31.2 and 35.2 using poultry manure and wheat straw as raw composting materials were conducted under natural ventilation. Various kinds of nitrogen transform and loss way were determined at different composting stages. The results indicated that TOC reduced gradually with the composting time. The lower the ratio of C/N, the less the degradation of TOC, and the total nitrogen in compost tended to decrease at low C/N, those were the contrary at high C/N. During composting, the ratio of C/N tended to decrease, the treatments of 31.2C/N and 35.2C/N decreased remarkably, but changed a little at the treatments of 12.4C/N and 17.4C/N. For the four compost treatments of 12.4 C/N, 17.4 C/N, 31.2 C/N, 35.2 C/N, the rate of nitrogen losing was 58.7%, 60.2%, 37.7%, 23.3% respectively. Main way of nitrogen losing was volatilization in the form of ammonia originated from ammonium. The main period of nitrogen losing was 3~7 d. The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and Org-N during composting changed remarkably; while, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ changed a little and only happened on later stage of composting, at 28 day of composting, the change percentage of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content accounted for only 0.25%~0.58% of total N change. Lower C/N resulted in more loss of Org-N and less loss of $\text{NH}_3 - \text{N}$ in the compost, while higher C/N in composting not only led to less loss of $\text{NH}_3 - \text{N}$ but also made $\text{NH}_3 - \text{N}$ turn into Org-N.

Keywords: high-temperature compost; C/N; nitrogen losing

集约化禽畜养殖业的迅速崛起, 使禽畜粪便污

染急剧发展, 成为环境污染的突出问题^[1]。畜禽粪便的无害化处理势在必行, 高温堆肥是将其转化为优质有机肥的重要的无害化和资源化途径。成熟的堆肥不仅可以提高作物的产量, 改善农产品的品质, 还能改善土壤的物理化学性质, 是一种优质的有机肥^[2,3]。

高温堆肥过程中普遍存在氮素损失的现象, 不仅污染环境, 而且降低肥料中的养分含量。据研究表明, 城市垃圾堆肥化处理过程中 N 损失量为 50%~60%^[4,5],

收稿日期: 2004-05-18

基金项目: 国家 863 项目“环境友好型肥料研制与产业化”

(2001AA246023); 国家十五攻关项目“高效有机肥与缓释肥产业化技术研究与开发”(2002BA516A03); 863 计划“新型多功能生物有机肥的研究与开发”(2002AA245031)

作者简介: 贺 琪(1978-), 男, 中国农业大学环境工程硕士研究生, 研究方向为废弃物处理与资源化。

联系人: 李国学, E-mail: ligx@cau.edu.cn

污泥约为 68%^[6],粪便最高达 77%^[7]。因此在堆肥中进行氮素损失控制成为关键问题,而高温堆肥中的氮素运动规律研究是进行氮素损失控制的基础。

堆肥过程中氮素转化主要包括两方面:氮素固定和氮素释放。通常在堆肥结束后,氮素有一定的损失,这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可能反硝化(Bishop 和 Godfrey, 1983)。堆肥中有机氮主要分布在不同的微生物群落和腐殖质库中(Tate, 1995)。有机氮作为堆肥的全氮的主要组成部分与全氮一样,在堆肥过程中有相同的变化趋势。以粪便和污泥进行堆肥时氨态氮在堆肥的初期呈增加趋势,而后急剧下降。铵态氮的变化趋势主要取决于高温、pH 值和堆肥材料中的氨化细菌的活性。因此铵态氮的转化,或者作为细胞质的氮源,或者通过硝化细菌转化为亚硝态氮和硝态氮,或者以氨气的形式挥发,这主要依赖于堆肥的环境条件。

堆肥过程中硝化作用、反硝化作用相互转化相互依存,是一个复杂的微生物活动过程。堆肥过程通常分为 2 个阶段:第 1 阶段是升温 and 微生物增加阶段,通常持续数日到几周,在这个阶段铵态氮会快速积累并提高 pH 值,这样在 50℃~70℃ 条件下导致铵态氮以氨的形式的大量损失;第 2 阶段是保温后腐熟阶段,主要特点是腐殖酸的形成和植物毒素的损失,由于铵态氮形成量减少,而硝态氮形成数量增加并且会以渗滤液(或雨水)的形式淋失。Kirchmann(1985)报道,未覆盖粪堆通过渗液可使 N 素损失 10%~14%。Christensen(1983)报道,生活垃圾堆肥通过渗滤液损失总氮达 7%~16%。

为了对高温堆肥过程中不同阶段各形态氮素转化和氮素损失定量化进行研究,本文设制了 4 种不同 C/N 比处理的自然通风堆肥试验,旨在探讨高温堆肥过程中氮素的形态变化趋势。

1 试验方法

1.1 堆制材料

鸡粪取自中国农业大学养鸡场笼养蛋鸡的粪便;小麦秸秆取自中国农业大学科学园试验田,经过粉碎机切割为 5 cm 左右的小段秸秆。其基本性状见表 1。

表 1 堆肥材料的主要成分

Table 1 Initial conditions and composition of the composting materials

原料类型	含碳量/%	含氮量/%	C/N 比	含水率/%
鸡粪	11.1	1.02	10.9	66.8
秸秆	43.6	0.71	61.4	10.9

1.2 堆肥装置

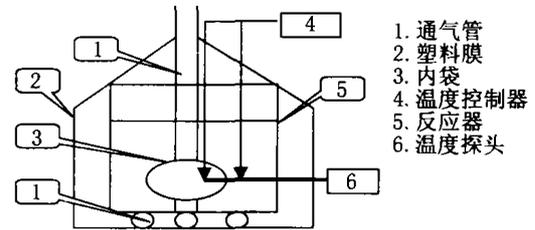


图 1 高温堆肥装置示意图

Figure 1 The diagram of equipment for high temperature composting

高温堆肥装置结构如图 1 所示,由堆肥反应器、塑料膜、导气杆、内袋、温度控制器等组成。

1.3 堆制方案

共设 4 个处理,其 C/N 比分别为 12.4、17.4、31.2、35.2,各处理水分控制在 65% 左右,堆制 28 d,从 4 月 24 日堆制到 5 月 21 日。堆制期间,每天早晚测定温度 2 次。同时分别在 0、3、7、14、21、28 d 时从内袋取样,重量在 100~300 g。样品分成 2 份,1 份为鲜样储存 4℃ 冰箱中待用,另 1 份在 105℃ 下烘干测定水分,粉碎留做干样待用。根据样品中含水率计算堆肥内外袋所需补充的水分,使其保持 65% 含量。在每次取样时进行人工翻堆。各处理按表 2 比例混合物料。

表 2 堆制混合物料性质

Table 2 The properties of the composting materials

C/N	混合样品干重/g	有机碳/%	全氮/%
12.4	2 555	28.9	2.34
17.4	1 225	34.9	2.01
31.2	1 120	40.6	1.18
35.2	1 015	41.5	1.18

1.4 测定项目与方法

鲜样测定:水溶性铵态氮和硝态氮采用 1 mol·L⁻¹ 的氯化钾溶液浸提,固液比为 1:20,稀释适当的倍数,通过流动分析测定铵态氮和硝态氮,同时滤液分别用来测定 pH 和电导率及发芽率指数。

干样测定:全氮采用硫酸—高氯酸联和红外消煮后通过凯氏定氮法测定;有机碳采用重铬酸钾容量法—磷酸浴外加热法测定。

2 结果与讨论

堆肥过程中碳源、氮源是微生物直接用来合成自身生命体的重要组成部分,有机物料中起始有效态碳、氮物质及分解过程中产生的碳、氮强烈地影响整个堆体的分解过程和氮的生物固定,而堆肥过程中的

氮素形态主要为氨态氮、硝态氮和有机氮。

2.1 堆肥过程中的碳、氮变化趋势

从图2可以看出4个处理的TOC随着堆肥的进行而逐渐降低,12.4_{C/N}、17.4_{C/N}、31.2_{C/N}、35.2_{C/N}4个处理的TOC的含量分别降低了18.17%、16.82%、28.28%、30.12%,可见过低的C/N比会降低有机物的降解速度;试验过程中的全氮含量变化如图3所示,12.4_{C/N}、17.4_{C/N}2个处理全氮的百分含量在0~3d下降较快,3~7d略有回升,7~14d左右又有1个快速下降阶段而后趋于平稳。由于这2个处理的C/N比较低,碳源成了微生物生长的限制因素,有机物的分解速度慢,大量富裕的氮素在堆肥初期随着温度、pH值的升高而出现损失。31.2_{C/N}、35.2_{C/N}2个处理的含氮量基本呈上升趋势,主要是因为堆肥的重量急剧下降的原因,虽然堆肥的氮素有损失,但是这2个处理的N素损失远较前2个处理要小。

由图4所示,4个堆肥处理过程中的C/N比均呈下降趋势,31.2_{C/N}、35.2_{C/N}2个处理的C/N比下降明显,这是因为有机质分解剧烈,而氮素损失较少的缘故。而12.4_{C/N}、17.4_{C/N}2个处理的C/N比变化不

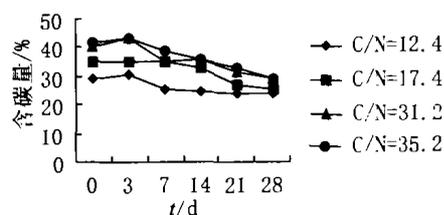


图2 堆肥过程中有机质变化

Figure 2 Changes of organic carbon during composting

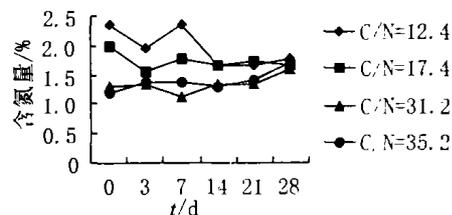


图3 堆肥过程中全氮变化

Figure 3 Changes of total nitrogen during composting

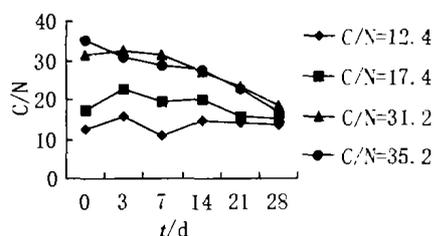


图4 堆肥过程中C/N比变化

Figure 4 Changes of C/N ratio during composting

大,是因为碳氮比过低,碳素分解缓慢,氮素损失严重造成的。

堆肥物料的碳、氮变化在堆肥中有特殊意义。在微生物的新陈代谢和细胞物质的合成中需要大量的营养元素和微量元素,如碳、磷、钾、氮、锰、镁、铜和钙等。碳在微生物新陈代谢过程中约有2/3变成二氧化碳而被消耗掉,1/3用于细胞质的合成,所以一部分碳被称为细菌的能量,而氮主要用于细胞原生质的合成。在堆肥过程中,有机物料的C/N比对分解速度有重要影响,根据对微生物的活动的平均计算结果可知微生物每合成1份氮,要利用4份碳作为能量和构成组织碳架。如以细菌为例,细菌的C/N比为4~5,而合成这样的体质细胞还要利用16~20份碳素来提供合成作用的能量,因此它们生长繁殖时,所需的C/N比是20~25;而真菌的C/N比约为10,所以堆肥过程中最佳C/N比为25~35。若C/N比超过40,可供消耗的碳元素多,氮素养料相对缺乏,细菌和其他微生物的生长受到限制,有机物分解速度就慢,发酵过程就长;如C/N比更高容易导致产品堆肥的C/N比过高,这种堆肥施入土壤后,将与作物争氮,影响作物生长,若C/N比低于20,可供消耗的碳素少,氮素相对过剩,则氮极易变成氨态氮而挥发,导致氮素营养大量损失。

2.2 堆肥过程中各氮素形态的变化趋势

堆肥过程中氮素形态之间的变化是一个复杂的过程,跟各阶段的微生物的组成密切相关。虽然氮有很多种形态,但在堆肥中其主要形态为铵态氮、硝态氮、有机氮。试验过程中的铵态氮含量变化如图5所示,12.4_{C/N}、17.4_{C/N}、31.2_{C/N}3个处理分别在7、7、3d有一个明显得高峰值,这是由于氮素含量相对较高,随着微生物快速生长和繁殖加速了有效氮的分解,并以铵态氮的形式快速积累的结果。而后随着温度、pH值的升高,积累的铵态氮以氨气的形式释放到大气,也有部分铵成为了细胞组织的合成过程中的氮源。35.2_{C/N}堆肥处理氨态氮含量呈缓慢下降趋势是因为氮素含量相对较低,没有过多的氮素积累。

图6表明4个处理的硝态氮含量的变化有相同的上升趋势。35.2_{C/N}的硝态氮含量在21d前略高于其他处理,这是因为另3个处理微生物含量较多反应剧烈,温度较高,抑制了硝化细菌的生长所致,而硝化细菌在堆肥后期出现。后期12.4_{C/N}堆肥处理中硝化细菌大量产生导致硝态氮含量迅速升高。有机态氮的变化主要是通过含氮有机物的氧化和微生物自身的

生命活动——氧化、还原、合成等过程产生变化的。

从图 7 中看到前 3 个处理有机氮含量有一个先降后升的过程, 主要是因为堆肥开始阶段氮源充足, 为满足微生物生长活动的需要, 含氮有机物在微生物的作用下被分解为无机养分主要为氨气^[9], 为微生物提供了氮源以及氨气迅速流失导致有机氮下降的结果。35.2 C/N 这个处理的有机氮缓慢上升是因为本身有机氮含量就较低, 而且含氮有机物的氧化较慢的原因。

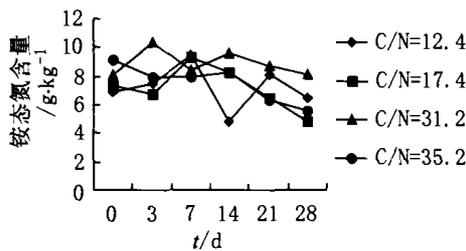


图 5 堆肥过程中铵态氮变化

Figure 5 Changes of NH₃-N during composting

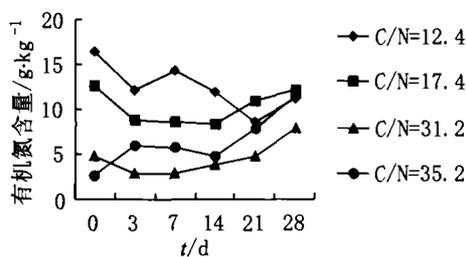


图 6 堆肥过程中硝态氮变化

Figure 6 Changes of NO₃-N during composting

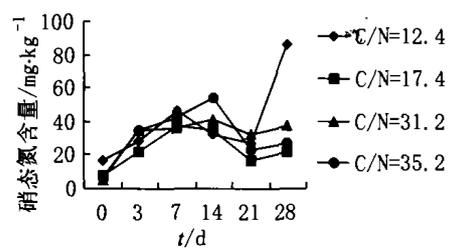


图 7 堆肥过程中有机氮变化

Figure 7 Changes of Org-N during composting

2.3 堆肥过程中氮素损失分析

堆肥过程中 C/N 比、pH、温度、通风量以及初始态氮含量都会影响到氮的损失量。试验过程中对氮素分析表明 12.4 C/N、17.4 C/N、31.2 C/N、35.2 C/N 的氮素总损失量分别为 28.25、10.52、3.875、1.809 g。其中氨态氮损失分别为 6.308、4.246、3.092、4.959 g；硝态氮分别增加了 0.074、0.008、0.017、0.011 g；前 3 个处理有机氮分别损失为 22.01、6.286、0.801 g，而 35.2 C/N 处理的有机氮增加了 3.139 g。可见在堆肥过程中主要是氨态氮和有机氮的变化，而硝态氮在堆肥

初期几乎没有生成，到 28 d 堆肥结束时硝态氮的含量也很少，分别为 0.116、0.018、0.024 和 0.018 g，分别占总氮含量的 0.58%、0.25%、0.37% 和 0.29%，所以高温堆肥过程中氮素损失主要是通过氨气的形式释放到大气中。

虽然氮素以氨气的形式排放到大气中，但是堆制原始物料中不同的氮素形态对其总氮损失的贡献不同。从图 9 中可以看出各处理不同氮素形态的损失量占总氮损失的百分率。12.4 C/N、17.4 C/N、31.2 C/N 堆肥处理的有机氮损失呈下降趋势，分别占氮总损失量的 77.9%、59.7%、20.7%，35.2 C/N 处理则增加了 174%；而氨态氮损失分别占总氮损失的 22.3%、40.3%、79.8%、274%。可以看出 C/N 越低其有机氮损失越多，而氨态氮损失越小，其损失的总氮量（以氨气形式释放到大气中）也越多。表明了在不同 C/N 比的堆肥处理过程中，随着 C/N 比的升高其有机物氧化的剧烈程度逐渐下降，产生的氨气逐渐减少，同时减少了满足微生物自身活动以外的过多氨态氮的浪费。但 C/N 比升高到一定程度后有机氮的氧化过程减弱，相对而言微生物的合成作用显著，导致氨态氮向有机氮的转化。例如 35.2 C/N 堆肥处理，虽然氮素损失少，但是由于 C/N 比较高，堆肥化过程中的氮源明显不足延长了堆肥的腐熟，而且容易导致腐熟成品堆肥中 C/N 比过高，这种堆肥施入土壤后，将与作物争氮，影响作物生长。

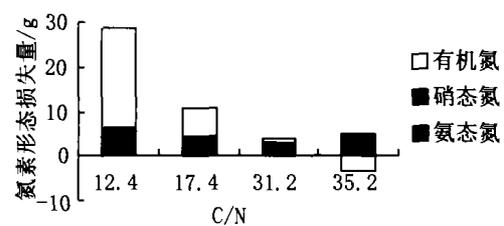


图 8 不同 C/N 比堆肥过程中各氮素形态损失量

Figure 8 The loss amount of various kinds of nitrogen during composting

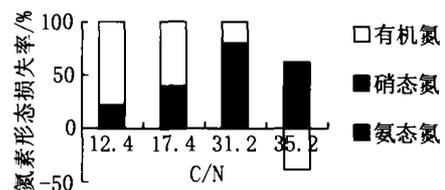


图 9 不同 C/N 比堆肥过程中各氮素形态损失率

Figure 9 The losing rate of various kinds of nitrogen during composting

3 结论

(1) TOC 随着堆肥的进行逐渐降低, C/N 比越低的堆肥 TOC 的降解越少。

(2) 低 C/N 比堆肥全氮含量呈下降趋势, 高 C/N 比堆肥处理的含氮量呈上升趋势。

(3) 堆肥过程中的 C/N 比均呈下降趋势, 高 C/N 比堆肥的 C/N 比下降明显, 低 C/N 比堆肥处理的 C/N 比变化不大。

(4) 经过 28 d 堆肥化处理, 4 种不同 C/N 比处理的氮素损失率分别为 58.7%、60.2%、37.7%、23.3%。C/N 比越低氮素损失越高, 氮素损失的主要途径为铵态氮以氨气的形式挥发, 堆肥进行 3~7 d 是氮素损失的主要时期。

(5) 堆肥过程中铵态氮和有机氮的变化最大, 硝态氮主要在堆肥后期略有形成。堆肥 C/N 比越低有机氮损失越多, 氨态氮损失越小。高 C/N 比堆肥氨态氮不仅损失少, 而且向有机氮转化。

参考文献:

[1] 杨朝飞. 加强禽畜粪便污染防治迫在眉睫[J]. 环境保护, 2001,

(2): 32-35.

- [2] McConnell D D, Shiralipour A, Smith W H. Compost application improves soil properties[J]. *Biocycle*, 1993, 34: 61-63.
- [3] Wong J W C, Li G X, Wong M H. The growth of *Brassica Chinensis* in heavy-metal contaminated sewage sludge compost from Hong Kong[J]. *Bioresour Technology*, 1996, 58: 309-313.
- [4] Brink N. Composting of food waste with straw and other carbon sources for nitrogen catching[J]. *Acta Agric Scandi Nave (Section B)*, 1995, 45: 118-123.
- [5] Kirchmann H, Widen P. Separately collected organic household wastes, chemical composition and composting characteristics[J]. *Swedish J Agric Res*, 1994, 3: 3-12.
- [6] Witter E, Lopez Real J. Nitrogen losses during the composting of sewage sludge[J]. *Biol Wast*, 1988, 23: 279-294.
- [7] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresour Technol*, 1992, 42: 103-111.
- [8] 史信建, 王莉平. 氮肥厂氨泄漏对循环冷却水的危害及解决方法[J]. 工业水处理, 1997, 17(6): 89-93.
- [9] Mahimairaja S, Bolan N S, Hedley M J. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment[J]. *Bioresour Technol*, 1994, 47: 265-273.