

人粪便生态厕所好氧降解过程氮的迁移转化研究(I)——高温堆肥

白帆^{1,2}, 王晓昌^{1*} (1 西安建筑科技大学环工学院, 陕西西安 710055 2 宝鸡文理学院地理科学与环境工程系, 陕西宝鸡 721016)

摘要 [目的] 研究人粪便生态厕所高温好氧堆肥氮的迁移转化。[方法] 利用密闭式好氧高温堆肥反应器, 以新鲜锯末为空白载体, 对高温堆肥条件下氮的迁移转化及堆肥产物的保氮特性进行了研究。[结果] 在高温 60℃、含水率 60% 以及连续强制供气条件下, 经过为期 2 周的堆肥, 粪便中有机物去除率达到 70% 以上, 而总氮 N_{tot} 的损失仅有 17%。氮的损失主要发生在堆肥反应的第 1 天, 由无机氮 N_{in} 的迅速减少造成, 而有机氮 N_{org} 几乎不变。占 N_{in} 90% 以上的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在堆肥反应第 1 天迅速降低, 此后缓慢减少至几乎消失。通过物料的平衡发现, 在堆肥反应第 1 天 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的减少量与堆肥反应的前 24 h 连续吸收的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的总量一致, 说明 $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是高温好氧堆肥过程粪便中氮损失的主要原因和控制的关键。[结论] 高温堆肥可成为一种能使堆肥产物中保持高含量的氮从而使其更好地作为有机肥的有效方法。

关键词 氮的保持; 堆肥反应器; 人粪便; 好氧; 高温

中图分类号 X 705 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2010)33-18816-03

Study on the Transfer and Transformation of Nitrogen in the Aerobic Degradation Progress in Biotoilet for Human Feces

BAI Fan et al (Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055)

Abstract [Objective] The research aimed to study the transfer and transformation of nitrogen in the aerobic composting process in the biotoilet for human feces. [Method] Using a closed aerobic thermophilic composting reactor with fresh sawdust as the blank vector, the transfer and transformation of nitrogen and the nitrogen-holding characteristics of composting products under the thermophilic composting conditions were studied. [Result] Under the controlled conditions of temperature of 60℃, moisture content of 60%, and continuous air supply, more than 70% fecal organic removal was obtained while merely 17% fecal nitrogen loss was observed in a two-week composting period. The nitrogen loss was found to occur mainly in the first day with quick depletion of inorganic nitrogen, but almost unchanged organic nitrogen content. The fecal $\text{NH}_4\text{-N}$ which was the main component of the inorganic nitrogen (> 90%) decreased quickly in the first day, gradually decreased in the following days, and finally disappeared. A mass balance between the exhausted NH_3 gas and the fecal $\text{NH}_4\text{-N}$ content in the first 24 hours indicated that the conversion of ammonium into gaseous ammonia was the main reason for nitrogen loss. [Conclusion] Thermophilic composting could be used as an efficient way to keep high nitrogen content in the composting products to be a organic fertilizer.

Key words Nitrogen holding; Composting reactor; Human feces; Aerobic; Thermophilic

好氧堆肥作为一种实用性技术, 用于生态厕所人粪便的卫生降解^[1-2]。该技术特别对于解决缺水或严重缺水地区利用水冲式厕所具有重要意义。由于堆肥产物可用作有机肥, 如能控制好堆肥条件使氮尽可能多的保留在最终的堆肥产物中, 将对其作为有机肥具有重要意义。目前在关于应用锯末作为载体的粪便堆肥研究中^[3-5], 有关氮损失的报道尚无定论, 有低于 50% 的也有高达 94% 的, 主要取决于堆肥的条件。目前, 关于好氧堆肥过程粪便中氮的损失和迁移尚不清楚, 有必要对其进行研究。为此, 笔者以新鲜锯末为空白载体, 利用密闭式好氧高温堆肥反应器, 研究了高温堆肥条件下氮的迁移转化和堆肥产物的保氮特征。

1 材料与方 法

1.1 试验设备 该研究所使用的设备为密封式堆肥反应器^[6](图 1)。该反应器的反应体采用有机玻璃加工而成, 由内外两层柱状有机玻璃构成, 内筒径 10 cm, 高 55 cm。外层空间装盛热水构成水浴环境以使内筒堆肥反应主体保持恒定温度。水浴温度由热水泵、温度传感器、加热棒以及温控微处理器进行联合控制。手动搅拌装置垂直置于堆肥反应体内, 通过搅拌手柄进行手动搅拌以使堆肥材料混合均匀。

内筒底部装有布气板以使通过气泵强制进气能够均匀分布进入反应堆中。顶部的排气管先于冷凝系统连接使得带出的蒸发的水分冷凝回收以便回加到反应器中, 以维持堆肥反应的水分稳定。冷凝后出气与装有 0.5 mol/L 的 1 L 稀硫酸溶液的氨气吸收单元连接以便对排气中的氨气进行吸收。

1.2 材料 空白载体锯末来自一家木材加工厂, 其成分主要是纤维素 (44%)、半纤维素 (约 18%) 和木质素 (约 35%)。人粪便来自校园学生区, 为保持试验粪便的初始性质一致和批试验间的可比较性, 收集到的粪便混合均匀后分装, -20℃ 冷冻保存备用。锯末和粪便的物化特性见表 1。

1.3 试验方法 试验参照 FAN B 等^[6]的方法进行。初始加料: 粪便: 锯末 (F/S) 为 25% (基于干重计), 补充 0.2 L 去离子水使初始加料的水分为 60%, 总重为 1.0 kg 混合均匀后加入反应器中密闭。在堆肥过程中, 温度、进气流速及搅拌频率见文献^[6]。

1.4 取样和分析 按照 FAN B 等^[6]的方法进行样品的取样和分析。分析水分、 S_{org} 、COD 和 TOC。堆肥过程中有机固体的减少源于粪便中有机物的降解, 因此有机固体含量的计算最终以基于干重 $g/(kg \cdot \text{干锯末})$ 表示。

滤液主要用于各种 N_{in} 成分的取样和分析^[6], 如亚硝态氮 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、硝态氮 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$, 其总和作为 N_{in} 。累积吸收的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 用吸收单元中吸收液的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度和吸收液总体积计算得到; 排气中铵态氮瞬时浓度和释放速率的取样和分析同上。

2 结果与分析

2.1 堆肥反应器对粪便中氮的迁移转化的作用 该研究表明, 人粪便生态厕所高温好氧堆肥多次重复试验, 有机物的

基金项目 国家自然科学基金 (50621140001); 国家水污染控制专项基金 (2008ZX07317-004); 长江学者基金和创新研究梯队 (RT0853); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA06Z328); 国家自然科学基金重大国际合作项目 (50621140001); 宝鸡文理学院院级重点项目 (ZK2559)。

作者简介 白帆 (1973-), 男, 陕西咸阳市人, 在读博士, 副教授, 从事水污染治理、固废处理以及资源回收利用等研究。* 通讯作者, 博士, 教授, 博士生导师, 从事水污染的控制、固废处理及利用和水生态环境研究, E-mail: xowan@xauat.edu.cn

收稿日期 2010-08-30

去除率最终均达到 70%^[6-8]。由图 2(a)可知, N_{tot} 在堆肥反应的第 1 天迅速降低, 在随后的时间里变化缓慢; N_{org} 的变化趋势与 N_{tot} 类似; 在堆肥的整个过程中 N_{org} 几乎没有变化, 表明在整个堆肥过程中只有 N_{ino} 参与了氮的迁移转化过程。图 2(b)显示了堆肥过程中 N_{ino} 的各种形态如 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和

$\text{NH}_4\text{-N}$ 间的相互转化过程。在堆肥的第 1 天三者均发生了明显变化。占 N_{ino} 中 90% 以上的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在堆肥第 1 天突然下降; 虽然 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量很低, 但在堆肥 1 d 后几乎消失; 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 却增加了相同的量; 在随后的堆肥时间里 $\text{NH}_4\text{-N}$ 缓慢变化而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 保持恒定。

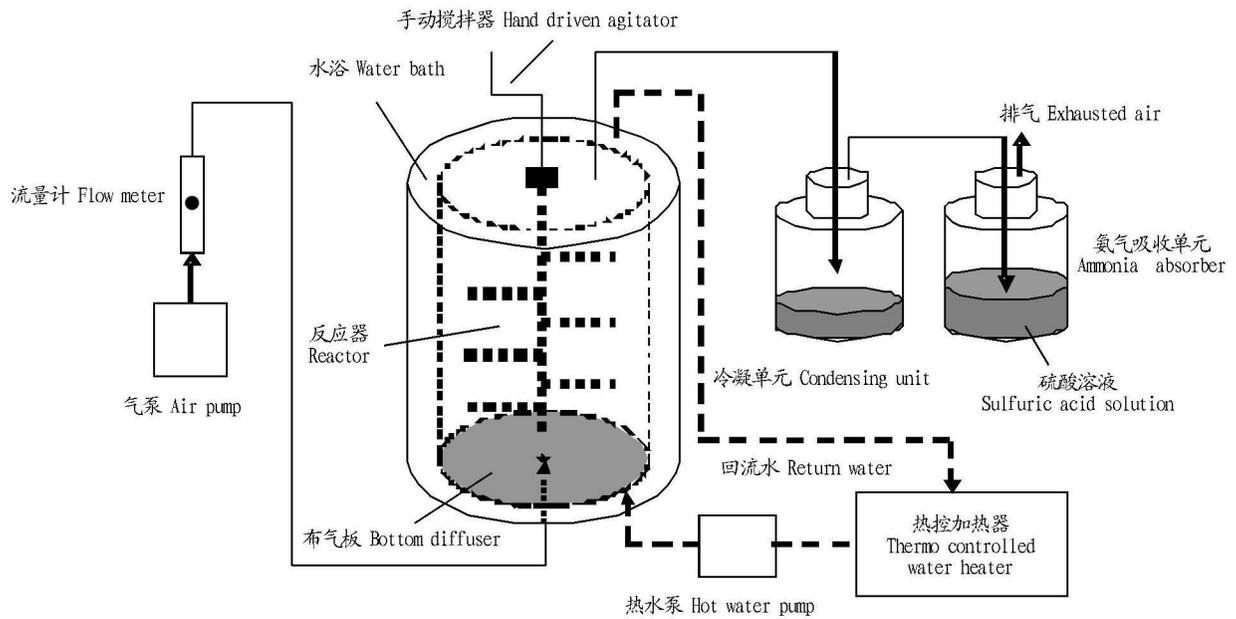


图 1 试验用堆肥反应器结构示意图

Fig 1 The structure of the experimental composting reactor

表 1 试验用锯末和粪便的物化特性

Table 1 Physicochemical properties of the saw dust and feces used in the experiment

项目 Item	含水量 / % Moisture content	S_{org} g/kg	TOC g/kg	COD_{Cr} g/kg	N_{tot} g/kg	N_{org} g/kg	N_{ino} g/kg
锯末 Saw dust	11.1	956.9	378.1	1270.3	2.10	2.10	0
粪便 Feces	81.8	901.0	497.9	1671.3	68.23	55.94	12.29

注: 除含水量外, 其他成分均是基于干重计。

Note: Except moisture content, other ingredients were calculated according to dry weight.

2.2 堆肥过程中前 24 h 排放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化 为了研究粪便中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在好氧高温堆肥过程中的变化, 分析了堆肥反应

前 24 h 吸收液中累积吸收的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的总量。由图 3 可知, 累积的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的量在堆肥开始后迅速增加并在堆肥反应 5 h 后达到 0.78 g ($\text{NH}_3\text{-N}$, 基于干重计); 在随后的堆肥时间里 $\text{NH}_3\text{-N}$ 缓慢增加, 在 24 h 后达到 0.81 g 并保持恒定。同时, 通过测定 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放速率的变化 (图 4) 分析了排气中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化, 进一步表明了高温堆肥条件下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放的变化规律^[9]: 堆肥初期前 2~3 h 瞬时速率迅速增加并达到最大值; 之后直到堆肥反应的第 18 h 又迅速减小到几乎为 0。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的累积吸收总量和释放速率的变化均表明, 高温堆肥时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的排放主要集中在堆肥反应的第 1 天 (准确为反应的前 5 h)。

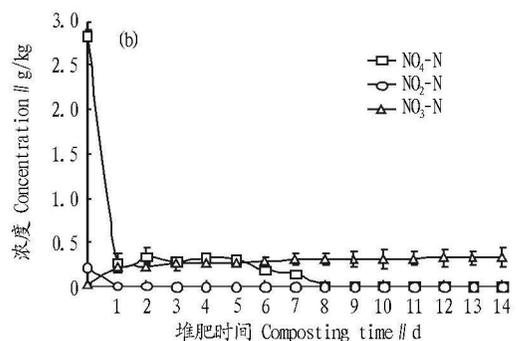
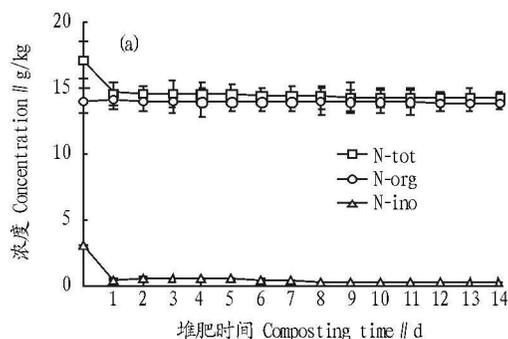


图 2 堆肥过程中粪便中氮的变化

Fig 2 Variation of fecal nitrogen in the composting process

2.3 堆肥过程中粪便中氮的物料衡算 堆肥过程中, N_{tot} 损失了 2.91 g/kg, 约占初始 N_{tot} 的 17%, 几乎全部 N_{tot} 损失来自 N_{ino} 。 N_{org} 几乎没有变化 (约 0.7% 损失)。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的损失构

成了 N_{ino} 的损失。虽然 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量很低, 但在堆肥 1 d 后减少到几乎消失, 而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 却增加了相同的量。结合图 3 发现, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的损失是由于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在高温堆肥时第 1 天就以

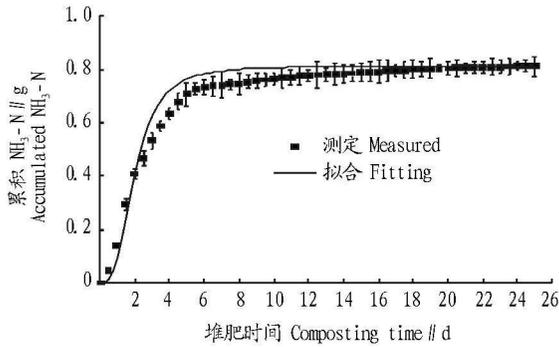


图3 堆肥反应第1天累积的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化

Fig 3 Gaseous ammonia accumulation changes in the first day of composting

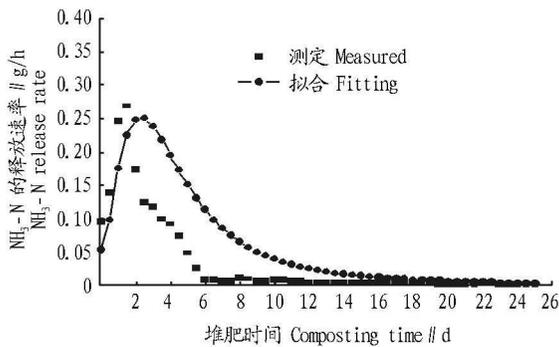


图4 堆肥反应第1天 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放速率的变化

Fig 4 The variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ release rate in the first day of composting

$\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发排出所致。24 h累积吸收的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为0.81 g,这与同一时期 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的损失量一致。

2.4 高温(60℃)堆肥过程中氮的保持特性 在该试验粪便中, N_{org} 占 N_{tot} 的82%,而 N_{ino} 占 N_{tot} 的18%(表1)。如图2所示,由于高温好氧堆肥条件,在堆肥初期(堆肥反应的前24 h)占到 N_{ino} 90%以上的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 迅速转化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发逸出。 NH_4^+ 离子转化为 NH_3 的化学方程式为: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$ 。

至于 N_{org} ,如果其在堆肥过程中要发生降解,不可避免的第一步将是进行氨化,即在氨化菌群存在时 N_{org} 转化为 $\text{NH}_4\text{-N}$,然而目前普遍认为多数氨化细菌是中温菌,适宜温度为中温(低于40℃)。从细菌生长和微生物活性角度看,该研究中采用的堆肥温度(60℃)显然不是中温的氨化细菌生长和具有活性的适宜温度。据此可知,可能在高温堆肥过程中,由于氨化细菌缺乏活性, N_{org} 的氨化被抑制^[9]。粪便高温堆

肥时氨气释放速率和累积总量规律表明,高温条件下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发主要在堆肥初期第1天(前5 h),取决于粪便中原有的 $\text{NH}_4\text{-N}$,随着 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的挥发逐渐减少, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的挥发速率呈现先增加后降低的趋势,累计总量迅速增加后稳定不变。即控制高温堆肥的氮损失关键在于控制堆肥初期的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发^[9]。最终,粪便中几乎所有的 N_{org} 都被保留在堆肥产物中。因此,可以认为高温堆肥是提高堆肥产物中氮的保持特性的一种有效方法。

3 结论

采用锯末为空白载体,利用好氧高温堆肥反应器分析了粪便中氮的迁移转化过程。在温度60℃、含水率为60%以及连续供气好氧条件下,粪便中有机物的去除率达到70%以上,同时粪便中氮仅有17%的损失。粪便中的氮分为有机部分和无机部分,无机部分包括 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。通过对其分析发现,损失的氮是由占无机部分氮的90%以上的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 受高温堆肥作用转化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发逸出造成的;尽管 $\text{NO}_2\text{-N}$ 初始含量很低,但在堆肥初期几乎完全消失,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 却增加了相同的量。占粪便中氮的82%的 N_{org} 在整个堆肥过程中几乎不变,最终被很好地保留在堆肥产物中。在60℃高温条件下,由于好氧堆肥反应器中的条件对于中温的氨化细菌的活性不适宜,氨化作用受到抑制。高温堆肥是一种在堆肥产物中保持高 N_{org} 的有效方法,使堆肥产物肥效更高。

参考文献

- [1] LOPEZ-ZAVALLA M A, FUNAMIZU N. Design and operation of the bioreactor system [J]. Water Science & Technology 2006 53(9): 55-61.
- [2] LOPEZ-ZAVALLA M A, FUNAMIZU N, TAKAKUWA T. Thermophilic Aerobic Biodegradation of Organic Matter [C]. Nanjing China The 1st International Symposium on Sustainable Sanitation 2003 33-40.
- [3] LOPEZ-ZAVALLA M A, FUNAMIZU N, TAKAKUWA T. Temperature effect on aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix [J]. Water Research 2004 38(9): 2406-2416.
- [4] SÁNCHEZ-MONEDERO M A, ROIG A, PAREDES C, et al. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures [J]. Bioresource Technology 2001 78(3): 301-308.
- [5] ZHU N W. Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw [J]. Bioresource Technology 2007 98(1): 9-13.
- [6] FAN B, WANG X C. Nitrogen retaining property of compost in an aerobic thermophilic composting reactor for the sanitary disposal of human feces [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China 2010 4(2): 228-234.
- [7] 王洪波, 王晓昌. 新型堆肥生物反应器人粪便堆肥功效的评价 [J]. 环境工程学报, 2008(1): 97-100.
- [8] 王洪波, 孙龔, 王晓昌. 以锯末为微生物载体的好氧堆肥反应器对人粪便降解特性的研究 [J]. 安全与环境学报, 2008(2): 43-46.
- [9] 郑国砥, 高定, 陈同斌, 等. 污泥堆肥过程中氮素损失和氨气释放的动态与调控 [J]. 中国给水排水, 2009(11): 121-124.

科技论文写作规范——摘要

摘要篇幅以50~300字为宜。试验研究和专题研究类论文,应写成报道性摘要。内容应包括研究工作的目的、方法、结果和结论。摘要应具有独立性和自含性,即不阅读全文,就能获得必要的信息。摘要中不出现图、表、化学结构式和非公知公用符号和术语,也不宜引用文中图、表、公式和参考文献的序号。但中文稿的英文Abstract可加注主要的图表序号,以便不同语言习惯的读者阅读。