

# 粪便好氧堆肥过程中温度对有机物的降解和氮的保持特性影响

白帆<sup>1,2</sup>, 王晓昌<sup>2\*</sup>

- (1. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡文理学院地理科学与环境工程系, 陕西 宝鸡 721016;  
2. 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 研究堆肥过程温度对有机物的降解, 尤其是氮的迁移转化的影响, 对于提高堆肥效率和保持更多的氮在产物中具有重要意义。本研究采用密闭式好氧堆肥反应器, 模拟高温 (60℃) 和中温 (35℃) 两种典型的堆肥温度, 以新鲜锯末为空白载体, 在含水率 60% 以及连续强制供气的条件下, 进行了为期两周的试验, 评估温度对于粪便中有机物的降解和氮的迁移转化的影响。结果表明, 粪便中有机物 (固体中的有机物, 总有机碳、化学需氧量) 高温去除率 70%, 比中温的 63% 高出 11%; 且堆肥腐熟期高温 (6~8 d) 比中温 (10~11 d) 缩短约 4 d。总氮的损失高温 (17%) 比中温 (31.4%) 减少了约 50%。高温下氮的损失发生在堆肥反应的第 1 d, 由无机氮的迅速减少造成, 有机氮几乎未变。中温下氮的损失在堆肥反应的前 4 d, 由无机氮和有机氮共同参与。研究表明, 温度对堆肥具有显著的影响, 控制合适的堆肥温度不仅可以加快有机物的腐熟, 提高效率, 还可以减少氮的损失, 提高产物的肥效。

**关键词:** 堆肥反应器; 人粪便; 氮的保持; 肥料

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1673-6257 (2011) 03-0068-04

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<sup>[1,2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。由于堆肥产物可用作有机肥, 如能控制好堆肥条件使得氮尽可能多的保留在最终的堆肥产物中, 将其作为有机肥具有重要的意义。目前应用锯末作为载体的粪便堆肥的研究中, 有关氮的损失报道尚不明确, 有低于 50%, 也有高达 94%, 主要取决于堆肥的条件, 特别是温度<sup>[4,5]</sup>。以前的部分研究, 采用日本科学技术振兴机构提供的 Bio-Lux S15 型堆肥反应器, 表明基于粪便卫生降解的生态厕所在高温条件下具有良好的保氮特性<sup>[6,7]</sup>。为了对温度对有机物的降解, 特别是氮的各种形态的迁移转化特性的影响进一步深入理解, 采用特定设计的反应器进行试验研究, 研究的重点是温度对氮的各种成分的变化和堆肥产物的保氮特性的影响。研究好氧堆肥过程粪便中氮的损失和迁移受温度的影响, 对于寻求合适的堆肥温度, 提高堆肥效率和减少氮

的损失, 保持更多的氮在产物中具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置和材料

本研究参考实际应用的堆肥反应器 (图 1) 参考 Lopez zavala 等人研究所用的反应器<sup>[7]</sup>, 设计加工了本研究实验用的密封式堆肥反应器, 如图 2 所示。该反应器采用有机玻璃加工而成, 由内外两层柱状有机玻璃构成, 内筒直径 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的温度。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的稳定。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。

作为生物载体的锯末均由西安市木材加工厂提供; 实验中定量投加的粪便取自该校学生公寓, 粪便由专人集中收集, 混合均匀分装冷藏于 -20℃ 的冰箱中保存。锯末和粪便理化性质见表 1。

收稿日期: 2010-08-21; 最后修订日期: 2011-01-24

基金项目: 长江学者基金和创新研究梯队 (IRT0853); 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 (50621140002); 宝鸡文理学院院级项目 (YK1030)。

作者简介: 白帆 (1973-), 男, 博士生, 主要研究方向为水污染治理、固废处理以及资源回收利用等。通讯作者为王晓昌。

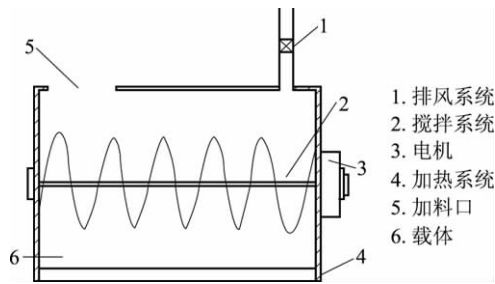


图1 Bio-Lux S15生态厕所的构造示意图

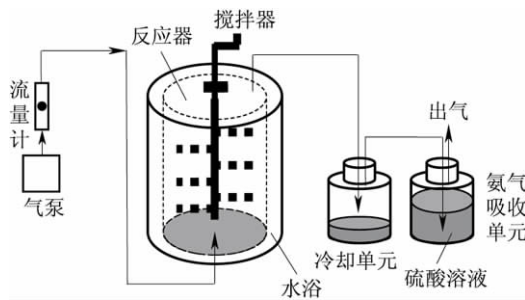


图2 实验堆肥反应器的结构示意图

表1 实验所用锯末和粪便的理化特性

项目	水分 (%)	固体中有机物	有机碳	化学需氧量	总氮	有机氮	无机氮
(g · kg <sup>-1</sup> )							
锯末	11.1	956.9	378.1	1 270.3	2.10	2.10	0
粪便	81.8	901.0	497.9	1 671.3	68.23	55.94	12.29

1.2 实验方法

实验方法是在实际应用研究的基础上进行确定的<sup>[7]</sup>。用水浴系统控制整个反应堆处于恒定的温度条件下；初始加料粪便、锯末比为 25%（基于干重），粪便 440.3 g（干重 80 g），锯末 360 g（干重 320 g），补充 200 mL 去离子水使得初始含水率为 60%，总重为 1 000 g，混合均匀后加入反应器中密闭。控制进气流量 1.6 L/min，进行好氧高温堆肥反应。手动搅拌间隔 8 h 搅拌一次，每次 2 min。每个实验重复 2 次以上，每次实验周期为 14 d，数据以均值和误差表示。

1.3 采样与分析

每天定时取样，取样前充分搅拌。每次取 10 g（湿样品），仅占总重的 1%，几乎不对堆肥产生影响。固体样品主要分析固体有机物（ $S_{org}$ ）、有机碳（TOC）、化学需氧量（ $COD_{Cr}$ ）、总氮（ $N_{tot}$ ）、无机氮（ $N_{ino}$ ）和有机氮（ $N_{org}$ ）。分析方法参考文献<sup>[7,8]</sup>，结果以基于干重的  $g \cdot kg^{-1}$  来表示。

2. 结果与分析

2.1 堆肥过程水分和 pH 的变化

从图 3 可以看出，在整个好氧高温堆肥过程中，堆体中的水分虽然有所下降，但在堆肥周期内仍能维持在 50% ~ 60%，这主要是由于水分受热挥发经冷凝后又回加到反应器中（除去少部分挥发逸出外）。该水分含量既满足好氧条件（水分大于 60% 易导致厌氧反应的发生），又可以保证足够的水活度和生化反应的顺利进行（水分大于 50% 即可保证水的活度大于 0.85 以上）。图 4 表明，pH 的变化不大，在堆肥初期稍有下降后逐步恢复，整个堆肥过程基本保持在 6 ~ 7.5 左右。

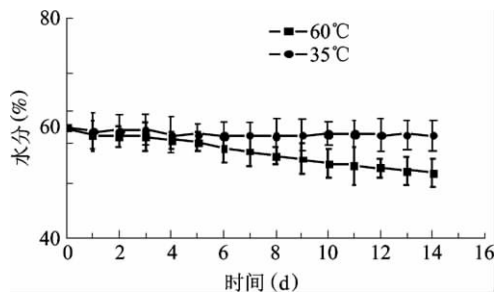


图3 堆肥过程中水分含量的变化

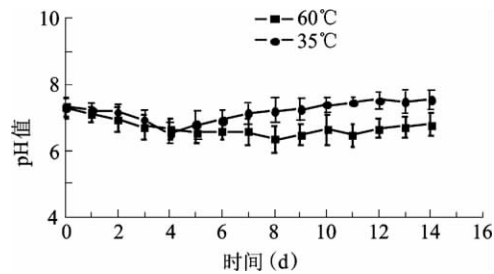


图4 堆肥过程中酸碱度的变化

2.2 堆肥过程中粪便有机物的降解性能

如图 5 和图 6，在堆肥周期内和好氧条件下，不论高温还是中温，堆肥反应器对粪便中的有机物均具有良好的降解去除效果（60% 以上）<sup>[1,2,9-11]</sup>。高温条件下堆肥结束后最终去除率达到 70% 以上，腐熟期为 6 ~ 8 d。相比较而言，中温堆肥条件下有机物的去除效率低些（63% 以上），腐熟期从高温的 6 ~ 8 d 延长至中温 10 ~ 12 d<sup>[9,10]</sup>。

2.3 堆肥过程中粪便中氮的迁移转化

图 7 和图 8 分别给出了高温和中温堆肥过程粪便中  $N_{tot}$ 、 $N_{org}$  和  $N_{ino}$  的每日变化。高温条件下， $N_{tot}$  在堆肥反应的第 1 d 迅速降低，在随后的时间里变化缓慢。 $N_{tot}$  的变化趋势与  $N_{ino}$  类似，在堆肥的整个

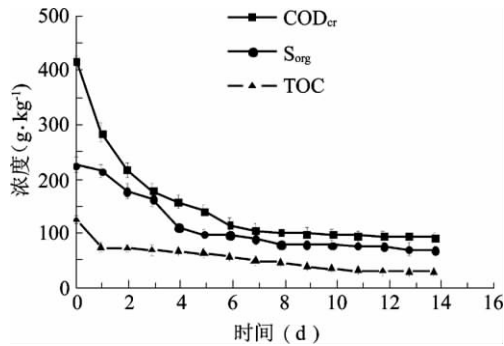


图5 高温 60℃堆肥过程粪便中有机物的变化

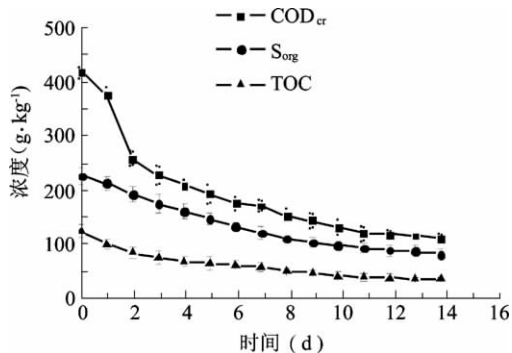


图6 中温 35℃堆肥过程粪便中有机物的变化

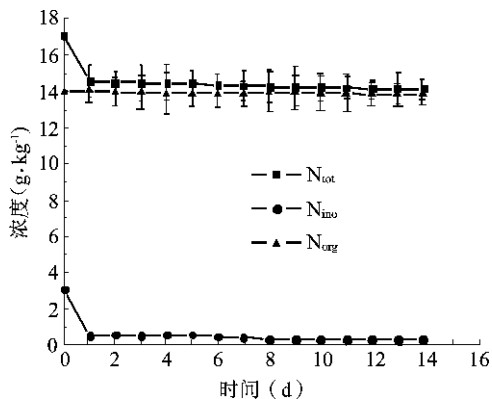


图7 高温 60℃堆肥过程中粪便中氮元素的变化

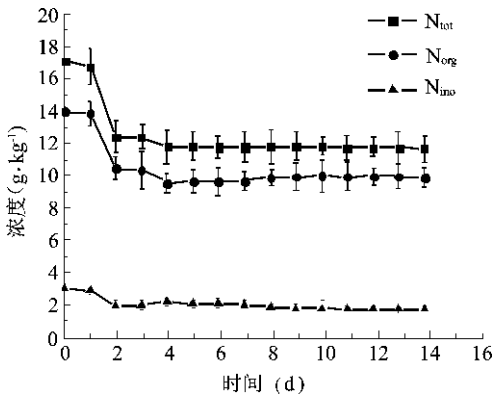


图8 中温 35℃堆肥过程中粪便中氮元素的变化

过程中  $N_{org}$  几乎没有变化。物料衡算  $N_{tot}$  损失 0.90 g, 与  $N_{ino}$  损失 0.89 g 一致, 这表明, 在整个堆肥

过程中只有  $N_{ino}$  参与了氮的损失 (17%)。而中温条件下,  $N_{tot}$ 、 $N_{org}$  和  $N_{ino}$  均在堆肥反应的前 4 d 迅速降低, 在随后的时间里变化缓慢; 物料衡算  $N_{tot}$  损失 1.71 g、 $N_{org}$  损失 1.29 g 和  $N_{ino}$  损失 0.43 g, 这表明, 在整个堆肥过程中  $N_{org}$  和  $N_{ino}$  共同参与导致了氮的损失加大 (31.4%)。

#### 2.4 堆肥过程中粪便中氮的物料衡算和氮的保持特性

高温堆肥条件下,  $N_{tot}$  损失了 0.90 g, 约占初始  $N_{tot}$  的 17%。 $N_{ino}$  损失了 0.88 g, 几乎全部  $N_{tot}$  损失来自  $N_{ino}$ 。 $N_{org}$  几乎没有发生变化 (约 0.7% 损失)。中温堆肥条件下,  $N_{tot}$  损失了 1.71 g, 约占初始  $N_{tot}$  的 31.4%。 $N_{ino}$  损失了 0.42 g。 $N_{org}$  损失 1.29 g。

对于  $N_{org}$ , 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  $NH_4^+ - N$ 。然而, 目前的文献 [12-14] 均认为多数氨化细菌和硝化菌等与有机氮迁移转化密切相关的菌群是中温菌, 适宜温度为中温 (低于 40℃)。从细菌生长和微生物活性角度看, 本研究中采用的高温 (60℃) 显然不是中温的氨化细菌生长和具有活性的适宜温度。据此可以假设, 在高温堆肥过程中, 由于氨化细菌缺乏活性,  $N_{org}$  的生化降解受到抑制。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。而中温堆肥导致部分有机氮发生生化降解, 使得氮的损失明显增加。

#### 3 结论

应用锯末为空白载体, 在含水率 60% 以及连续供气好氧条件下, 在好氧堆肥反应器中, 分析了温度对粪便中有机物的降解, 特别是氮的迁移转化的影响。结果表明:

1) 温度对有机物的去除率稍有影响, 在高温下达到 70% 以上, 略高于中温的 68%; 但明显影响堆肥腐熟期, 使得高温堆肥的腐熟期比中温提前了约 4 d。

2) 温度显著影响粪便中氮的损失, 高温堆肥时氮的损失仅 17%, 远低于中温堆肥的 31.4%, 低了约 50%。

3) 对氮损失的途径有明显的影响: 高温堆肥时损失的氮是由无机部分氮迅速下降造成的。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,产物肥效提高。而中温条件下,氮的损失较为复杂,包括  $N_{org}$  的生化降解损失和  $N_{ino}$  的损失,部分  $N_{org}$  保留在堆肥产物中,产物肥效降低。

4) 在高温好氧堆肥中,有机氮几乎不变。而中温堆肥时,有机氮部分发生了生化降解作用。说明高温抑制了与氮生化降解的微生物的活性,这有待于进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Kitsui T, Terazawa M. Bio-toilet, Environmentally friendly toilets for the 21<sup>st</sup> century [C]. Yokohama, Japan: The 10<sup>th</sup> International Symposium on Wood and Pulp Chemistry, 1999. 120-121.
- [2] Lopez-Zavala M A, Funamizu N. Design and operation of the bio-toilet system [J]. Water Science & Technology, 2006, 53 (9): 55-61.
- [3] Wang X C, Jin P K. Water shortage and needs for wastewater reuse in the north China [J]. Water Science & Technology, 2006, 53 (9): 35-44.
- [4] Sanchez-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] Hotta S, Funamizu N. Biodegradability of fecal nitrogen in composting process [J]. Bioresource Technology, 2007, 98 (17): 3412-3414.
- [6] 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.
- [7] Bai F, Wang X CH. 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.
- [8] 国家环境保护部. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 环境科学出版社, 2002.
- [9] Lopez-Zavala M A, Funamizu N, Takakuwa T. Thermophilic aerobic biodegradation of organic matter [C]. Nanjing, China: The 1<sup>st</sup> International Symposium on Sustainable Sanitation, 2003. 33-40.
- [10] Lopez-Zavala 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.
- [11] Lopez-Zavala M A, Funamizu N, Takakuwa T. Biological activity in the composting reactor of the bio-toilet system [J]. Bioresource Technology, 2005, 96 (7): 805-812.
- [12] 王立群, 曹立群, 肖维伟, 等. 鸡粪好氧发酵氮转化与相应细菌数量变化规律的研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2008, (5): 61-65.
- [13] 单德鑫, 许景钢, 李淑芹, 等. 牛粪堆肥过程中有机态氮的动态变化 [J]. 中国土壤与肥料, 2008, (1): 40-43.
- [14] 曹喜涛, 黄为一, 常志州, 等. 鸡粪堆肥中氮转化微生物变化特征的初步研究 [J]. 土壤肥料, 2004, (4): 40-43.

#### Effect on biodegradation and nitrogen holding property from temperature during aerobic composting for sanitary disposal of human feces

BAI Fan<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-chang<sup>2\*</sup> (1. Dept of Geo-science and Environmental Engineering, Baoji University of Arts & Sciences, Baoji 721016; 2. Key Lab of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, MOE, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

**Abstract:** It would be favorable to improve biodegradation of feces and hold more nitrogen in compost if the effect on biodegradation and nitrogen holding property from temperature was found out during aerobic composting in bio-toilet for sanitary disposal of human feces. In this study, batch experiments were conducted using a closed aerobic composting reactor with sawdust as the bulky matrix to simulate the condition of a bio-toilet for sanitary disposal of human feces. Attention was paid to the effect on biodegradation and nitrogen holding property from temperature. Under a controlled condition of temperature at 60°C and 35°C, moisture content at 60%, and continuous air supply, more than 70% fecal organic removal was obtained with merely 17% fecal nitrogen loss observed at 60°C in a two-week composting period, while more than 63% fecal organic removal with 31.4% fecal nitrogen loss at 35°C. Compost maturity period decreased from 10~12 days at 35°C to 6~8 days at 60°C. The nitrogen loss (17%) was found to occur mainly in the first day with quick depletion of inorganic nitrogen, but almost unchanged organic nitrogen content at 60°C. While the nitrogen loss (31.4%) was mainly in the first 4 days from both inorganic nitrogen and organic nitrogen content at 35°C. The result showed that temperature has obviously effect on composting, controlling temperature could improve compost effect, shorten composting maturity period, decreased fecal nitrogen loss, keep high organic nitrogen content in the composts for better fertilizer utilization.

**Key words:** composting reactor; human feces; nitrogen holding; fertilizer