

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.016

# 不同类型的外加碳源对污泥堆肥过程氮素损失的影响

李云蓓<sup>a</sup>, 李伟光<sup>a,b</sup>

(哈尔滨工业大学 a. 市政环境工程学院; b. 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

**摘要:**以城市污泥为研究对象,采用葡萄糖、蔗糖、秸秆粉及其混合物作为外加碳源,研究了不同类型的外加碳源对堆肥系统一次发酵周期内氨气挥发的影响。探讨了碳源的降解效率与堆肥系统氮素损失的作用关系。结果表明,与对照试验氨气挥发总量相比(3.05 g/kg·ds),单独添加葡萄糖(2.46 g/kg·ds)与蔗糖(2.17 g/kg·ds)均能控制氨气的挥发,但单独使用秸秆粉没有显著效果(3.1 g/kg·ds)。蔗糖与秸秆粉混合添加对高温期氨气挥发的控制效果最好(1.92 g/kg·ds),堆肥系统中总氮损失由对照试验 53.1%减少至 27.7%;堆肥过程中氨气挥发与碳源的降解具有显著负相关性( $R = -0.94, p < 0.005$ ),秸秆粉与葡萄糖、蔗糖混合添加增强了微生物对有机碳的降解能力,促进无机氮的固定作用,减少了氮素的损失。

**关键词:**外加碳源;污泥;堆肥;氮素损失;氨气

**中图分类号:**X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)02-0104-06

## Influence of Carbon-Rich Amendments on Nitrogen Losses During Sewage Sludge Composting

Li Yunbei<sup>a</sup>, Li Weiguang<sup>a,b</sup>

(a. School of Municipal and Environmental Engineering;

b. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

**Abstract:** Different extra carbon sources (glucose, sucrose and straw powder) were added during sewage sludge composting. According to the results, separate add of the glucose (2.46 g/kg·ds) and sucrose (2.17 g/kg·ds) could reduce NH<sub>3</sub> emission compared with the amount of NH<sub>3</sub> emission (3.05 g/kg·ds). No significant reduction of nitrogen loss was found in the mixture of P3 amended with straw powder alone (3.1 g/kg·ds). Adding the mixture of sucrose and straw powder had significant effect on reducing ammonia emission (1.92 g/kg·ds). A good linear correlation between the carbon degradation rate and ammonia emission was found with correlation coefficients of  $-0.94 (p < 0.005)$ . The combination of straw with glucose and sucrose could enhance the decomposition of organic carbon. The carbon source which has more readily degradable composition is helpful to nitrogen immobilization.

**Key words:** carbon-rich compound; sewage sludge; composting; nitrogen loss; ammonia

市政污泥堆肥技术以其成本低廉,能有效杀灭病原菌、达到废物减容化和稳定化的效果等优点而倍受人们的关注,并已成当前污泥无害化和资源化

的主要途径之一<sup>[1-2]</sup>。但堆肥过程中存在严重的氮素损失问题,其中70%以上的氮素损失是由氨气挥发造成的,不仅对环境造成了二次污染,同时大大降

收稿日期:2013-11-05

基金项目:国家自然科学基金(51278146)

作者简介:李云蓓(1984-),女,博士生,主要从事固体废弃物处理与资源化研究,(E-mail)liyunei@163.com。

低了堆肥产品的农用价值,限制了这一技术的发展及应用<sup>[3-5]</sup>。在众多影响因素中,物料的碳氮比是堆肥过程控制以及堆肥产品质量评价的重要指标,同时也是影响氮素损失主要因素<sup>[6]</sup>。Haug<sup>[7]</sup>提出堆肥过程最适宜的碳氮比范围为15~30。当堆肥物料碳氮比值低于15时,由于氮素相对充足,多余的氮素极易以氨气的形式损失;而当碳氮比高于30时,相对过剩的碳源又会在一定程度上阻碍有机质的降解,延长堆肥周期<sup>[8-9]</sup>。

黄向东以及熊建军等<sup>[10-11]</sup>在研究中发现通过补充富含碳源物质可提高物料的碳氮比,控制氮素损失。而Ekland等<sup>[12]</sup>认为在堆肥过程中添加富含碳源的材料对氮素损失的控制并没有显著的效果。Liang<sup>[13]</sup>指出当添加不同化学组成的碳源的时候,仅提高碳氮比并不能有效控制氮素损失,碳源的组成及结构也起到关键的作用。根据以往的研究可

知,堆肥过程氮素损失的控制主要集中与考察不同碳氮比的影响,而不同生物降解特性的碳源对氮素损失的影响以及碳源在氮素损失控制中的作用过程目前尚不清晰。

根据微生物对碳源的降解能力,通过添加不同类型碳源,分析堆肥过程不同时期氨气挥发特征及变化规律,讨论了不同类型碳源降解效率与氨气挥发之间的相互关系,为分析碳源在堆肥过程氮素损失控制中作用机制提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 堆肥材料

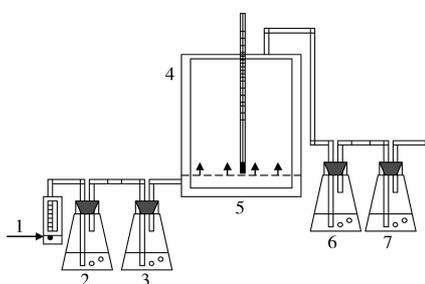
脱水污泥取自哈尔滨文昌污水厂污泥脱水车间,木屑取自哈尔滨木材加工厂,所用外加碳源为葡萄糖,蔗糖,麦秆粉及其混合物,堆肥试验方案及堆肥物料基本性质如表1所示。

表1 各堆肥处理试验条件与物料性质

处理	外加碳源组成	含水率/%	pH值	有机质/%	总氮/%
R1	5g 葡萄糖	63.4	5.45	68.6	2.29
R2	5g 蔗糖	62.7	5.23	72.1	2.46
R3	5g 秸秆粉	63.5	7.52	77.5	2.39
R4	5g 葡萄糖+5g 秸秆粉	61.8	5.31	66.3	2.26
R5	5g 蔗糖+5g 秸秆粉	62.5	6.14	68.9	2.29
R6		62.1	7.63	67.6	2.46

### 1.2 堆肥装置及试验条件

堆肥试验共设6个处理条件(R1-R6),通风速率 $200\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,一次发酵周期22 d,试验方案如表1所示。反应器组成如图1。试验期间将反应器置于恒温水浴内,根据堆体内部的温度对恒温水浴箱进行阶段升温,以期模拟实际堆肥的自升温过程。



注:1. 气体流量计;2. NaOH 溶液;3. 蒸馏水;4. 水浴保温;5. 反应器主体;6. 2%硼酸;7. NaOH 溶液

图1 堆肥反应器示意图

### 1.3 样品分析

试验周期内每天记录堆体内部温度,分别在堆

肥启动(0 h),高温期(72 h),高温期结束(144 h)以及堆肥结束(528 h)4个时间节点取样分析,在取样之前将物料充分混合。将取好的样品分为3份,1份 $105^{\circ}\text{C}$ 烘干24 h用于测含水率和有机质;一份样品自然风干粉碎后测定物料的TN、TOC;另1份储存于 $4^{\circ}\text{C}$ 冰箱,用于测定pH值。pH值:样品与去离子水以比例1:10(质量/体积)混合均匀后测定;TOC:硫酸重铬酸钾外加热法;DOC:将污泥与蒸馏水以1:50比例在常温震荡提取6 h,8 000 rpm/min离心10 min后,过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜后,样品进TOC-VCPH分析测定;总氮(TN):凯氏定氮法。氨气及二氧化碳分析分别采用硼酸及氢氧化钠溶液吸收后用一定浓度的HCL滴定分析。

### 1.4 计算方法

堆肥过程氮素损失计算公式如下:

$$N_{\text{Loss}} = 100 - 100 \frac{X_1 N_2}{X_2 N_1} \quad (1)$$

其中: $X_1, X_2$ 分别为初始及结束时灰分的含量,%; $N_1, N_2$ 分别为初始及结束凯氏氮的含量,%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆肥过程常规参数变化

2.1.1 堆体温度变化 堆肥过程的温度变化间接反映了微生物对有机物的利用情况,同时也是判断堆肥过程是否达到无害化要求的重要指标之一<sup>[14]</sup>。由图 2 可知,6 个处理条件下,堆体温度均在第 3 d 达到最高温度,随即进入高温期,并在高温范围内( $>55^{\circ}\text{C}$ )维持至少 2 d 时间,此时大量的病原菌和杂草种子被灭活,从而实现堆肥过程无害化要求。试验中高温期维持时间普遍较短,分析其原因可能是由于在试验室模拟堆肥过程中,由于堆体体积较小,其可供微生物利用的热量来源物质也较少,造成了堆体高温期相对较短,但是这一现象在实际的工程应用中并不是限制因素<sup>[15]</sup>。添加不同类型的碳源物质对堆体温度的影响并不显著。6 个处理条件下,均能顺利完成堆肥升温过程,高温期结束后,由于大部分可降解有机物已被利用,堆肥系统散失的热量大于产生的热量,堆体温度缓慢下降,并逐渐达到环境温度,一次发酵过程得以完成。

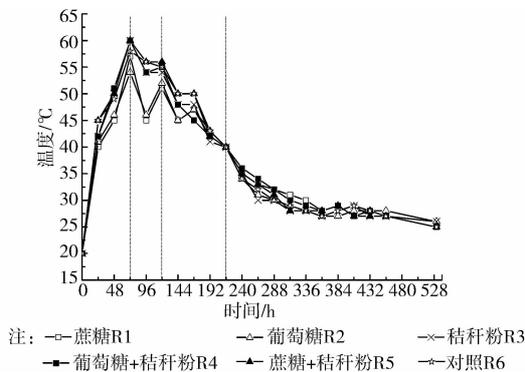


图 2 堆肥过程中温度的变化

2.1.2 堆肥过程 pH 值变化 堆肥物料的 pH 值直接影响铵态氮在堆肥物料中的存在状态,是影响氮素损失的主要因素。当物料 pH 值大于 8 的时候,有机氮降解产生的大量铵态氮以氨气的形式存在,因此极易挥发到大气中<sup>[16]</sup>。同时,pH 值也是保证微生物生长繁殖的基本条件,pH 值过高或者过低都将影响堆肥过程有机质的降解。如图 3 所示,整个堆肥周期内 pH 值的变化趋势基本相同,即高温期达到最高值,随后缓慢下降,一次发酵周期结束后,堆体 pH 值维持在中性范围。而堆肥初始 pH 值由于加入的碳源不同,存在一定的差异。在加入葡萄糖与蔗糖的处理中,堆肥初始 pH 值最低为 5.23,低于添加秸秆粉(7.52)与对照试验(7.63),可能是由于所加入的碳源在微生物的作用下部分分解

为有机酸,从而降低了物料初始 pH 值。在前期试验中,作者发现适当降低 pH 值可以显著减少氨气的挥发。但是,随着堆肥反应的进行,有机氮在微生物作用下发生矿化反应从而积累大量的铵态氮,使堆体 pH 值在高温期迅速上升。一次发酵结束后,所有处理中,pH 值均维持在 7.0~7.5 范围内。这种中性环境既是堆肥产品稳定化的象征,同时也有利于后续腐熟过程的顺利完成,从而满足堆肥产品的后续应用要求。

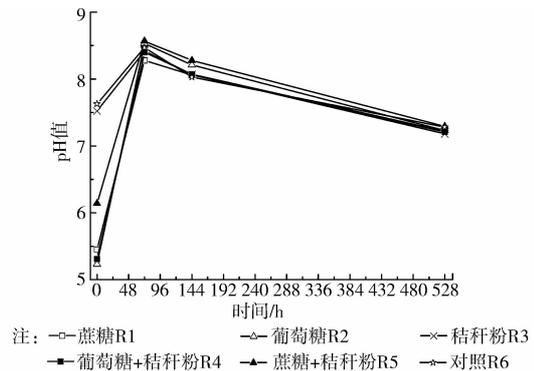


图 3 堆肥过程 pH 值变化

### 2.1.3 堆肥过程有机碳降解及二氧化碳含量变化

堆肥物料有机碳(TOC)的变化直接反映了微生物对有机碳的降解能力,由图 4 可知,与对照试验相比,各处理条件下,外加碳源的添加均提高了初始物料 TOC 的含量。在未加入碳源的条件 R6 中,TOC 的降解主要发生在堆肥启动至高温期阶段,但在加入蔗糖以及葡萄糖和秸秆粉的混合物处理条件下,TOC 在高温期后期仍有少量降解反应发生。各处理条件下,有机碳的降解效率分别为 26.3%,27.9%,25%,35.1%,33.7% 和 18.9%。葡萄糖、蔗糖均可以增加堆肥物料 TOC 的降解速率,即微生物的活性有所增加。但是,单独添加秸秆粉对微生物降解 TOC 的能力并没有促进作用。同时,根据堆肥过程二氧化碳释放结果(图 4-2)可得到相类似的结论,二氧化碳通常是由微生物对有机碳的矿化过程中产生的,Komilis 等<sup>[17]</sup>指出,二氧化碳的变化可间接反映堆体内部微生物活性的变化。添加葡萄糖与秸秆粉堆肥实验中,微生物的对有机质的降解效率最高,其二氧化碳释放量总量为 2.5 g/kg·ds,其次为添加蔗糖与秸秆粉混和堆肥条件下,添加秸秆粉处理条件下,二氧化碳的释放量为 1.93 g/kg·ds,而对照试验中,二氧化碳的释放量最少,仅为 1.81 g/kg·ds,即在对照组堆肥物料中能够被微生物利用的碳源也相对较少,因此其微生物活性相对较低。

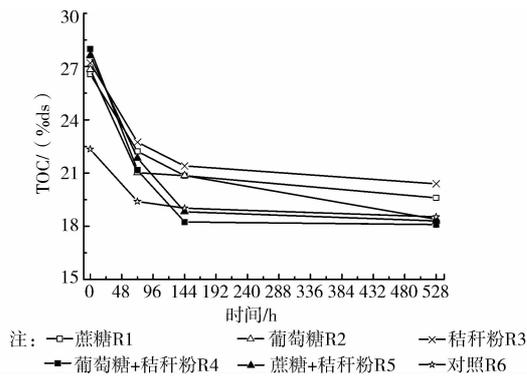


图 4-1 堆肥过程 TOC 的变化

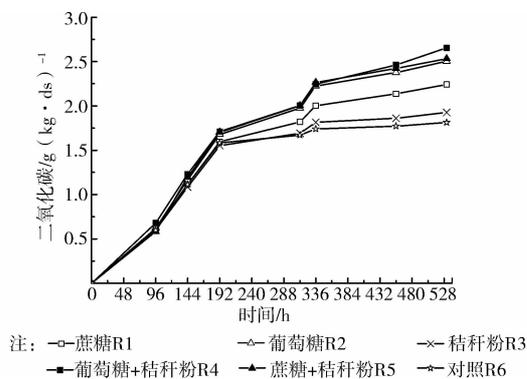


图 4-2 堆肥过程二氧化碳释放量

加秸秆粉对氨气挥发的控制并没有显著效果。由图 5-1 可知,大约 79% 以上氨气的挥发是在堆肥过程的高温期发生。因此,降低高温期氨气的挥发能够显著减少整个堆肥过程氨气的挥发量。

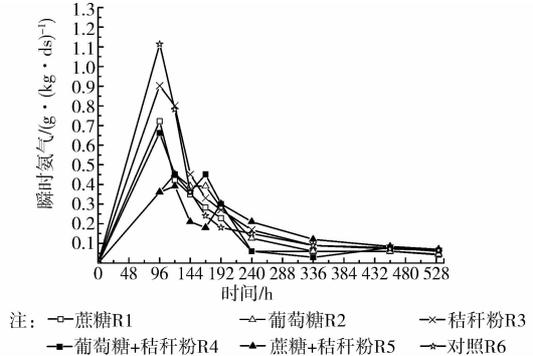


图 5-1 堆肥过程瞬时氨气释放量

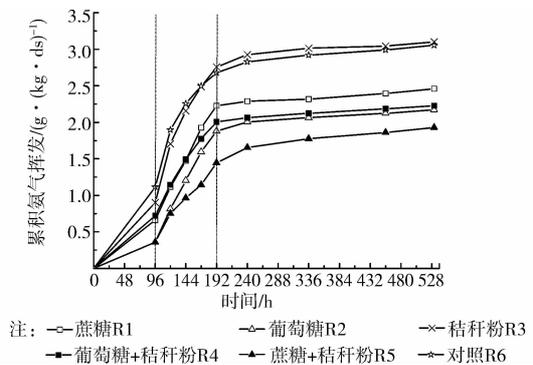


图 5-2 堆肥过程累积氨气释放量

## 2.2 氨气挥发及氮素损失

2.2.1 堆肥过程氨气挥发 由图 5-1、5-2 可知,添加不同类型的碳源,对堆肥过程氨气的挥发具有显著影响( $p < 0.001$ ),尤其是堆肥高温期。在整个堆肥过程中,随着堆体温度的升高,氨气的挥发量急剧增加,R6 和 R3 的瞬时氨气挥发量在 96 h 达到峰值,而在 R2,R4 及 R5 中,其氨气挥发量峰值出现的时间要略晚于其他处理条件,大约在 168 h,并且氨气挥发量最高值也只有对照试验的 1/3。由图 5-2 可知,R5 中累积性氨气挥发量由对照试验的 3.05 g/kg·ds,减少至 1.92 g/kg·ds,即通过加入蔗糖或者葡萄糖与秸秆粉的混合物,能够显著降低高温期堆肥系统氨气的挥发,而单独添

### 2.2.2 堆肥过程总氮损失

如表 2 所示,堆肥初始物料中总氮含量基本相同,而在经过 22 d 好氧堆肥后,堆肥物料总氮含量存在显著的差异,为了避免有机质降解对氮素损失的影响,根据式(1)计算各条件下总氮的损失情况。其中添加蔗糖与秸秆粉的处理中,氮素损失最少,为 27.7%,而单独添加秸秆粉处理与对照试验相比,总氮损失情况基本相同,虽然单独使用秸秆粉对氮素损失的控制基本没有效果,但是当其与蔗糖或者葡萄糖联用的时候,却能够在一定程度上减少氮素的损失。

表 2 堆肥前后氮素损失

处理	初始总氮/%	堆肥结束总氮/%	初始总氮/灰分	堆肥结束总氮/灰分	总氮损失/% <sup>a</sup>
R1	2.29	2.39	0.97	0.61	36.4
R2	2.46	2.35	0.92	0.59	35.0
R3	2.39	1.80	0.97	0.46	52.4
R4	2.26	1.91	0.87	0.52	40.3
R5	2.29	2.44	0.90	0.65	27.7
R6	2.46	1.59	0.91	0.43	53.1

a:计算方法依据 1.4 中公式(1)

### 2.3 有机碳降解效率对氨气挥发的影响

由图6相关性分析结果可知,有机碳降解过程中所释放的二氧化碳与氨气存在显著负相关性( $R = -0.94, p < 0.005$ ),而Barrington等<sup>[18]</sup>也在研究中得到类似的结论。即有机碳的降解效率与氨气的挥发量密切相关。因此,研究有机碳的降解效率对氨气挥发的控制具有重要意义。

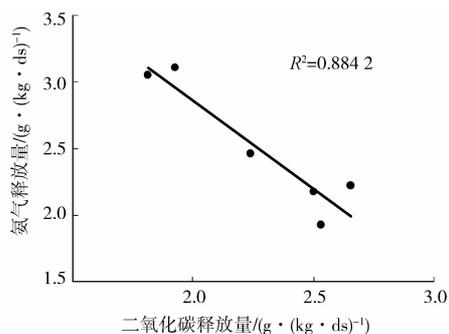


图6 二氧化碳与氨气挥发相关性分析

在以往的研究中,有关碳源的降解效率与氨气挥发之间的相互关系的研究较少,而碳氮比被认为是影响氨气挥发的主要因素。虽然所添加的碳源物质均能够提高碳氮比,但是其对氮素损失的控制效果具有显著的差异。而这一结果与Subair<sup>[19]</sup>得到的结论类似,即高碳氮比并不是控制氨气挥发的必备条件,只有补充能够被微生物降解利用的碳源才能够对氨气挥发的控制发挥积极作用。由实验结果可知,葡萄糖和蔗糖这类易降解的碳源降低了高温期氨气的挥发,减少了氮素损失,而试验中蔗糖的效果优于葡萄糖,这可能是由于葡萄糖在堆肥反应启动后立即被微生物利用,而此时,物料中并没有大量的积累铵态氮,因此不利于无机氮的固定反应进行。而蔗糖由于其在结构上比葡萄糖复杂,因此降解速率要慢于葡萄糖,这也给铵态氮的积累提供了一定的时间。由于在无机氮的微生物固定作用中,碳源以及铵态氮是必不可少的两个底物,因此只有当这两种底物都达到一定浓度的时候,氮的固定作用才会发生。由二氧化碳的释放量可知,秸秆的单独加入并没有提高有机碳的降解效率,有机碳的降解效率也间接反映了微生物的活性。因此,堆肥过程微生物的活性并没有发生变化,其对氨气挥发的控制不具有积极的作用。

但是,将葡萄糖或者蔗糖与秸秆粉混合添加,获得了较好的保氮效果。由有机碳的降解效率可知,葡萄糖和蔗糖的加入增加了微生物的活性,从而使一部分不可利用的碳源在此条件下被降解,同时秸秆粉中也有少量的可利用碳源,通过混合投加碳

源,微生物活性得以提高,因此秸秆粉中部分不易降解的碳源有可能部分被微生物利用,从而提高了堆肥过程有机碳的降解效率,促使微生物利用更多的氨氮,并将其固定为有机氮,即促进了铵态氮的固定作用。

## 3 结论

在以往的研究中,通过补充富含碳源的物质,提高碳氮比以减少氨气的挥发,所使用的碳源包括秸秆、稻草、树叶以及木屑等微生物较难利用的物质,而其控制氮素损失的效果并不理想。因此,往往需要大量的投加。而这类物质的加入,在一定程度上延长了堆肥反应周期,增加了生产成本。本研究中对对比分析了不同类型的碳源对氨气挥发控制的效果,主要结论如下:

1) 添加易降解碳源葡萄糖和蔗糖可以降低氨气的挥发,而单独添加秸秆粉这类难降解的碳源对氨气挥发的控制没有显著效果。

2) 秸秆粉与蔗糖混合添加对氨气挥发的控制效果最好,实验过程中氨气挥发的总量由 $3.05 \text{ g/kg} \cdot \text{ds}$ 降至 $1.92 \text{ g/kg} \cdot \text{ds}$ ,同时总氮的损失由 $53.1\%$ 降至 $27.7\%$ 。

3) 氨气的挥发与二氧化碳释放量呈显著负相关( $R = -0.94, p < 0.005$ ),即氨气挥发的控制与所加入碳源的降解效率密切相关,同时堆肥过程有机氮的矿化过程对氨氮的固定作用也具有一定影响。

### 参考文献:

- [1] 李伟光,王科,邹锦林,等. 污泥高温好氧发酵有机质降解动力学研究[J]. 中国给水排水, 2011(17):101-104.  
Li W G, Wang K, Zou J L, et al. Study on dynamics of organic matter degradation in sludge thermophilic aerobic fermentation[J]. China Water & Wastewater, 2011(17):101-104.
- [2] Wang K, Li W G, Guo J. Spatial distribution of dynamics characteristic in the intermittent aeration static composting of sewage sludge[J]. Bioresource Technol, 2011,102(9):5528-5532.
- [3] Doublet J, Francou C, Poitrenaud M, et al. Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability[J]. Bioresource Technol, 2011,102(2):1298-1307.
- [4] 杨延梅. 通风量对厨余堆肥氮素转化及氮素损失的影响[J]. 环境科学与技术, 2010(12):1-4,19.  
Yang Y M. Influence of ventilation on nitrogen

- transformation and loss during composting of kitchen waste [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(12):1-4,19.
- [5] Guardia d A, Mallard P, Teglia C, et al. Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, nitrogen dynamic [J]. *Waste Manage*, 2010, 30(3):415-425.
- [6] Jiang T, Schuchardt F, Li G, Guo R, Zhao Y. Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(10):1754-1760.
- [7] Haug R T. *The Practical Handbook of Compost Engineering*[S]. USA: Lewis Publishers, Boca Raton; 1993.
- [8] 郑瑞生, 封辉, 戴聪杰, 等. 碳氮比对堆肥过程  $\text{NH}_3$  挥发和腐熟度的影响[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(9):59-63.
- Zheng R S, Feng H, Dai C J, et al. The influence of C/N ratio on  $\text{NH}_3$  emission and compost maturity [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(9):59-63.
- [9] 赵秋, 鲍艳宇. 堆肥过程中氮素损失的控制[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(7):375-378.
- Zhao Q, Bao Y Y. The nitrogen loss and control methods during composting [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(07):375-378.
- [10] 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 X D, Han Z Y, Shi D Z, et al. Nitrogen loss and its control during livestock manure composting [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(01):247-254.
- [11] 熊建军, 刘淑英, 邹国元, 等. 秸秆不同用量对污泥堆肥保氮效果研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(1):175-178.
- Xiong J J, Liu S Y, Zou G Y, et al. Effect of different straw doses on nitrogen preserving during sludge composting [J]. 2010, 41(1):175-178.
- [12] Ekland Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses [J]. *Bioresource Technol*, 2000, 74(2):125-133.
- [13] Liang Y, Leonard J J, Feddes J J R, et al. Influence of carbon and buffer amendment on ammonia volatilization in composting [J]. *Bioresource Technol*, 2006, 97(5):748-761.
- [14] Lashermes G, Barriuso E, Le V P M, et al. Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility [J]. *Waste Manage*, 2012, 32(2):271-277.
- [15] Pagans E, Barrena R, Font X, et al. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes-Dependency on process temperature [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(9):1534-1542.
- [16] Philippe F X, Laitat M, Wavreille J, et al. Ammonia and greenhouse gas emission from group-housed gestating sows depends on floor type [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(3/4):498-505.
- [17] Komilis D P, Ham R K. Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste [J]. *Waste Manage*, 2006, 26:62-70.
- [18] Barrington S, Choinière D, Trigui M, et al. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses [J]. *Bioresource Technol*, 2002, 83(3):189-194.
- [19] Subair S. *Reducing ammonia volatilization from liquid hog manure by using organic amendments*[D]. Canada, McGill University, 1995.

(编辑 胡玲)