

沸石添加剂对污泥堆肥过程中的氨挥发及相关因素的影响

许俊香, 刘本生, 孙钦平, 赵同科, 李吉进*

(北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要:以污泥和秸秆为基本堆肥原料,向其中添加不同比例的沸石(5%和10%),采用密闭室动态吸收法,分析了污泥堆肥过程中的氨挥发速率以及氨挥发的相关影响因素。结果表明:堆肥中添加5%和10%的沸石,与对照相比显著降低了氨挥发累积速率27.9%和48.7%,并且延迟1d出现氨挥发峰值。沸石添加剂对氨挥发影响因素温度、pH值、EC和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均有显著影响,添加沸石缩短堆肥高温期3d,降低堆肥中后期堆体温度(降幅为0.17~13.5℃),增加堆体0.09~0.22个pH单位,维持堆肥更低电导率(1876.7~2636.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),降低堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 9.07%~22.2%。污泥堆肥中添加沸石降低了氨挥发累积速率,保留了堆体中的有效氮,在堆肥工程中具有较为广阔的应用前景。

关键词:沸石;污泥堆肥;氨挥发;相关因素

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)01-0081-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0285

Effects of Zeolite Addition on Ammonia Volatilization and Influence Factors in Sludge Composting

XU Jun-xiang, LIU Ben-sheng, SUN Qin-ping, ZHAO Tong-ke, LI Ji-jin*

(Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: An experiment of sludge composting was conducted to study the effects of zeolite addition (occupying the wet weight of sludge and straw 5% and 10%) on ammonia volatilization and influence factors. Sludge and straw were raw materials. The results indicated that adding 5% and 10% zeolite to the sludge could significantly decrease the NH_3 volatilization cumulative rate of 27.9% and 48.7%. The pH value of composting with zeolite addition increased 0.09~0.22 compared with the contrast. Electrical conductivity (EC) of composting with zeolite addition maintained lower level which were 1876.7~2636.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Zeolite addition decreased the content of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by 9.07%~22.2% when compared with the contrast. Zeolite as an additive in sludge composting could decrease the cumulative rate of ammonia volatilization. Thus, zeolite is a new potential additive which will bring prospects of application in sludge composting.

Keywords: zeolite; sludge composting; ammonia volatilization; influence factors

污泥是污水处理过程中产生的沉淀物质以及污水表面漂出的浮沫所得的残渣。据统计数据,截至2011年,全国各省、市、县累计建成城镇污水处理厂3115座,污水处理能力达到496亿t^[1],由此将产生巨量的污泥,如处置不当将会引发严重的环境污染问题。污泥中主要成分为有机物,含有丰富的氮磷钾等养分,如能将其进行合理的堆肥处理,可转害为利。堆肥处理已经成为污泥无害化和资源化的重要途径之

一^[2]。堆肥中氮含量是确定其农用价值最重要的参数之一,然而,在堆肥化过程中,氨挥发是高温好氧堆肥过程中氮素损失的主要途径^[3-4],其造成的大气污染在堆肥工程实践中也受到越来越多的关注^[5-6]。

沸石作为一种非金属矿物材料,晶体中具有大量的孔穴和孔道^[7-8],孔穴度高达40%~50%,使沸石具有很大的比表面积,因而沸石有很好的吸附能力。利用沸石吸附能力强的特点,将沸石应用到污泥堆肥工程中,对于降低氨挥发、减少大气污染具有重要的意义。

本研究以污泥和秸秆为堆肥基本原料,通过添加不同比例的沸石,分析了堆肥过程中的氨挥发速率以及影响氨挥发的相关因素,旨在探讨沸石作为调理剂在污泥堆肥工程中的应用潜力。

收稿日期:2014-10-23

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303101-6,201303089-2)

作者简介:许俊香(1977—),女,河北滦县人,硕士,副研究员,主要从事废弃物资源化利用研究。E-mail: xujx100@126.com

*通信作者:李吉进 E-mail: lijijin65@163.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

污泥取自北京排水集团污泥处置分公司庞各庄污泥处置厂。秸秆为玉米秸秆,是长度 0.5 cm 左右的秸秆粉。沸石取自河北赤城。堆肥原物理化性质见表 1。

表 1 堆肥原物理化性质

Table 1 Physicochemical property of composting materials

指标	污泥	秸秆	沸石
全氮 /%	3.39	0.89	—
全磷(P ₂ O ₅)/%	3.16	0.35	—
全钾(K ₂ O)/%	0.10	2.1	1.85
有机质 /%	44.1	64.8	—
pH 值	7.48	7.18	7.87
含水量 /%	78.6	5.0	—

1.2 试验设计

试验于 2013 年 4 月 26 日—5 月 20 日在北京市农林科学院植物营养与资源研究所日光温室内进行。

污泥堆肥试验采用容积为 3 600 mL 的保温壶作为装置。以污泥和秸秆为堆肥基本原料,试验设置 3 个处理,分别是:污泥和秸秆作为基础堆肥材料,记作 S;基础堆肥原料中添加沸石,沸石设置 2 个水平,添加量分别是污泥和秸秆总鲜重的 5% 和 10%,分别记作 S+5%Z 和 S+10%Z。污泥与秸秆的重量比(以鲜重计)为 4:1,污泥秸秆基础物料重为 1.25 kg。每个处理 3 次重复。堆体初始含水率控制在 60%~65%。污泥堆肥过程中保温壶不盖盖子以保证好氧条件。试验第 2、8、18 d 翻堆。

1.3 测定项目与方法

温度测定:试验每日 9:00 am 测定堆体温度,测量深度为距堆体表面 5 cm 处,并记录气温。

氨挥发速率:采用密闭室动态吸收法测定。进气口和出气口位于保温壶橡胶塞中央,为了防止来源于其他处理或周围空气中的氨对试验结果的影响,进气口连接装有硼酸的广口瓶用以吸收空气中的氨。测定氨挥发时,盖上橡胶塞,各处理的出气口并联后连接到抽气泵上。密闭室换气频率为每分钟 15 次以上。从堆肥第 2 d 开始测定,每日上午 9 点抽气 10 min,收集气体,用标准酸滴定。直到连续 3 d 监测不到氨挥发时停止。

pH 值和 EC:称取 5.0 g 样品,加入 50 mL 去离子水,振荡浸提 30 min,测定悬浮液的 pH 值及电导率。

铵态氮:称取鲜样 10.0 g,加入 50.0 mL 1.0 mol·L⁻¹ 的 NaCl 浸提,振荡 15 min,然后取上清液测定 NH₄⁺-N。

含水量:用 80 °C 恒温箱烘至恒重,含水量=(湿重-干重)×100%/湿重。

1.4 数据分析

采用 SAS6.12 中 ANOVA 程序对数据进行单因素方差分析,显著性水平取 5%。

2 结果与分析

2.1 添加沸石对堆肥氨挥发速率的影响

由图 1 可以看出,氨挥发主要发生在堆肥前 9 d,集中在 3~7 d。试验第 2 d,添加沸石的 2 个处理(S+5%Z 和 S+10%Z)堆肥氨挥发速率低于 S 处理,降低比例分别为 61.2% 和 76.2%。之后随着堆肥高温阶段的到来各处理的氨挥发速率均迅速上升,S 处理于试验第 3 d 出现氨挥发峰值,S+5%Z、S+10%Z 处理于试验第 4 d 出现氨挥发峰值,且后两者氨挥发速率峰值与前者相比可分别降低 28.7% 和 43.1%。试验第 5~8 d,堆肥氨挥发速率逐渐降低,试验第 9 d,氨挥发出现小幅上升,主要是由于试验第 8 d 堆体翻堆所致。试验第 10 d 以后,随着堆肥由高温发酵阶段过渡到腐熟阶段,氨挥发速率逐渐下降,并趋于零。添加沸石的 2 个处理,堆肥过程中氨挥发速率均低于 S 处理,其中 S+5%Z 处理降幅为 2.70%~46.5%,S+10%Z 处理降幅为 30.0%~78.6%。

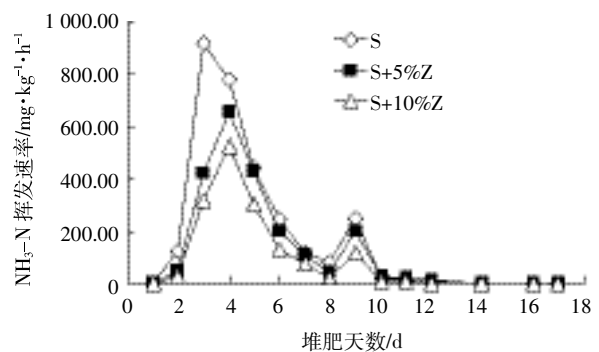


图 1 添加沸石对堆肥氨挥发速率的动态影响

Figure 1 Effects of zeolite on the ammonia volatilization rate

由表 2 可知,堆肥氨挥发累积速率 S+10%Z 处理显著低于 S 处理,降低比例为 48.7%;S+5%Z 处理与 S 处理相比、S+10%Z 处理与 S+5%Z 相比,堆肥氨挥发累积速率分别降低 27.9% 和 28.9%,但均未达到显著差异水平。

表2 氨挥发累积速率

处理	氨挥发累积速率 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$
S	3 002.4 a
S+5%Z	2 165.4 ab
S+10%Z	1 540.2 b

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 添加沸石对污泥堆肥氨挥发相关因素的影响

2.2.1 温度变化

由图2可以看出,试验第2d,堆体温度即开始上升,达到了40~50℃。第3d,堆体温度达到了60℃以上,之后55℃以上的高温阶段持续了9~12d(S处理12d,S+5%Z和S+10%Z处理均为9d),满足了堆肥卫生学指标的要求(堆体温度在55℃以上保持时间大于3d(或50℃以上保持5~7d)能杀灭物料中致病微生物)。随着堆肥腐熟阶段的到来,堆体温度逐渐下降,直至趋近于环境温度。沸石作为添加剂,对堆肥前期主要是试验3~7d的温度影响不大,但对试验8~16d的堆肥温度有降低的作用,降幅为0.17~13.5℃。

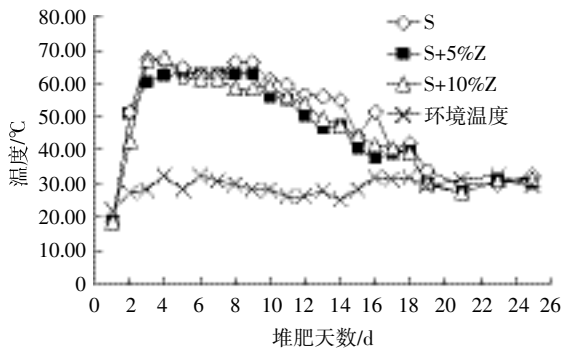


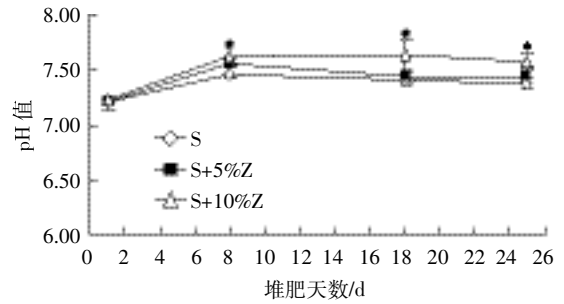
图2 污泥堆肥温度变化

Figure 2 Temperature changes of sludge compost

2.2.2 pH值和电导率(EC)

由图3可以看出,试验前期(第1~8d),由于有机质在微生物的强烈作用下分解产生大量 NH_3 ,堆体pH值较堆肥原始材料升高;随试验继续进行,堆体 NH_3 挥发速率和强度不断下降,硝化作用加强,以及有机质分解产生有机酸,从而使堆体pH值稳中有降^[9]。试验第8d,S+5%Z和S+10%Z 2个处理的堆体pH值显著高于S处理0.09和0.15个pH单位;试验第18、25d,S+10%Z处理的堆体pH值显著高于S处理0.22和0.20个pH单位。

由图4可以看出,本试验的3个处理EC值维持在 $1\ 876.7\sim 2\ 893.3\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间。试验初始,3个处理堆体的EC没有显著差异,随着试验开展,试验第8、



“*”表示该取样时间处理间有显著差异, $P<0.05$,下同

图3 不同处理堆肥过程中pH值变化

Figure 3 Effects of zeolite on the pH of compost

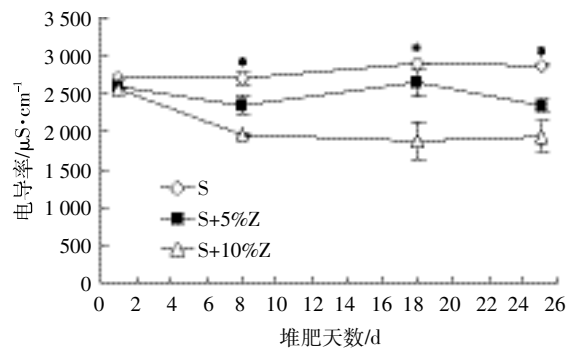


图4 不同处理堆肥过程中电导率的变化

Figure 4 Effects of zeolite on the EC of compost

18、25d,堆体EC值 $S>S+5\%Z>S+10\%Z$,差异显著,说明添加沸石可以显著减少堆体中可溶性盐含量,沸石添加比例越大,EC值减少越多。

2.2.3 铵态氮

从图5可以看出,整个堆肥过程中,铵态氮含量呈现先升高后降低的现象。试验初始,各处理的堆体铵态氮含量均较低,添加沸石的2个处理与S处理相比,降幅为14.7%~22.5%;试验进行到第8d,堆体铵态氮含量迅速增加;之后,堆肥由高温阶段过渡到腐熟阶段而逐渐稳定,堆体铵态氮浓度不断下降。添加

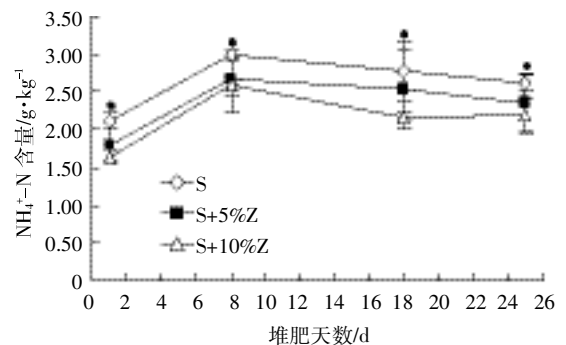


图5 添加沸石对堆肥铵态氮含量的影响

Figure 5 Effects of zeolite on the amount of NH_4^+-N of compost

沸石的 2 个处理,堆肥始末,堆体中的铵态氮含量显著低于 S 处理,其中 S+5%Z 处理降低比例为 9.07%~10.7%,S+10%Z 处理降低比例为 13.3%~22.2%。

2.2.4 堆体含水量

水分是影响堆肥腐熟速度的重要参数,合适的水分是保持微生物最佳活性的必要条件^[10]。图 6 是污泥堆制过程中水分含量的动态变化。如图 6 所示,堆肥中含水量整体呈现下降的趋势。堆肥开始,堆体含水量控制在 60%~65%,随着堆肥进行,微生物活动消耗水分以及堆体高温使水分蒸发,堆体含水量迅速下降,试验第 18 d 至堆肥结束,微生物活动微弱,堆肥稳定,水分含量只受蒸发因素影响,堆体含水量变化较小,保持在 33.1%~40.0%之间。S+10%Z 的处理,堆体含水量低于 S 和 S+5%Z 处理,但差异并不显著。

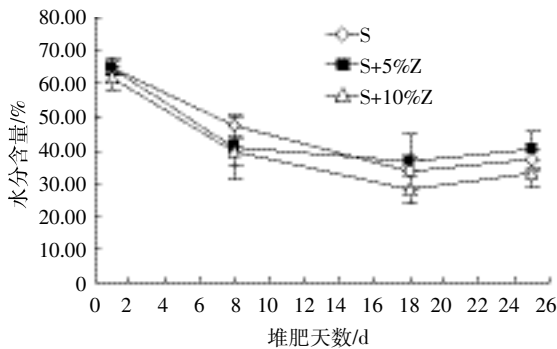


图 6 添加沸石对堆体水分含量的影响

Figure 6 Effects of zeolite on the water content of compost

3 讨论

堆肥过程中,伴随着有机物料的快速分解产生大量的氨挥发损失,主要发生在堆肥的高温阶段^[11]。污泥堆肥中添加不同比例的沸石,降低氨挥发速率的效率不同。沸石添加 5%,试验第 2~9 d,与 S 处理同天相比降低氨挥发速率 2.70%~61.2%;试验第 10~12 d,氨挥发速率反而增加,增加比例为 11.8%~136.5%,其原因可能是添加 5%的沸石,前期吸附氨气效果较好,氨挥发速率较低,随着试验进行,添加的沸石吸附效率达到饱和以及一部分氨解吸出来,增加了氨挥发速率。沸石添加 10%,与 S 处理同天相比降低氨挥发速率 30.0%~89.6%。可见,堆肥时添加 10%的沸石,对降低氨挥发速率的效果优于添加 5%沸石的处理。

影响堆肥氨挥发的因素主要有温度、pH 值、EC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。

堆肥的温度变化是反映发酵是否正常进行最直接和最敏感的指标,也是影响氨挥发速率大小的重要

因素^[12]。本研究中 S、S+5%Z 和 S+10%Z 处理 55 °C 以上的高温期分别持续了 12、9 d 和 9 d,此时期正是氨挥发的主要阶段,由于添加沸石的堆肥其高温阶段与不添加沸石相比持续时间缩短了 3 d,而且添加沸石降低了堆肥中后期堆体的温度(降幅为 0.17~13.5 °C),从而降低了堆肥氨挥发累积速率,本研究中降低比例为 27.9%~48.7%。

适宜的 pH 值可使微生物有效地发挥作用,减少堆体氨挥发损失,从而保留堆体中的有效氮^[13]。堆肥中添加 10%的沸石,对于提高堆体 pH 值有一定的促进作用,尤其在堆肥中、后期堆体 pH 值较其他 2 个处理显著升高,可能是随着试验开展沸石晶体中的 NH_4^+ 取代其他电荷离子进入堆体^[14]以及沸石本身中性偏碱(pH 值为 7.87)共同作用造成的。有研究表明,氨挥发主要在 pH 值较高的状态下进行^[15-16],但在本研究中,添加沸石增加了堆体 pH 值并未增加氨挥发速率,反而对其有降低作用,可能是随着添加的沸石增多,其中的孔穴和孔道亦随之增多,增加了对 NH_3 的吸附能力,降低了堆肥氨挥发累积速率,从而保留了堆体中的有效氮。

电导率(EC)反映了堆肥中可溶性盐的含量,沸石用作土壤调理剂时,其浸提液的 EC 不宜超过 4 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[17-18],否则会影响作物的正常生长。随着沸石添加比例的增加,堆体 EC 含量显著降低,其原因可能是沸石对有机质分解产生的无机盐有吸附作用,降低了堆体 EC 含量。

堆肥中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是氨挥发的直接来源,并且在氨挥发强度较大时期, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是堆肥中无机氮的主要存在形式^[19-20]。试验初始,微生物活动较弱,有机氮还未开始分解,堆体铵态氮含量普遍较低;随着污泥堆肥继续发酵,有机氮快速分解产生大量的 NH_3 ,由于堆体的含水率较高,生成的氨主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式存在于堆体中,堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量迅速增加^[21-22],该段时间氨挥发速率也随之加快;之后,堆肥由高温阶段过渡到腐熟阶段而逐渐稳定,堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度不断下降,硝化作用加强,氨挥发速率也随之降低。添加沸石,对降低堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有显著的影响(降低比例为 9.07%~22.2%),说明沸石具有较高的离子交换和吸附性能,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有很强的亲和性和选择性^[23],这可能是添加沸石使堆肥氨挥发降低的主要原因。

天然沸石具有强大的吸附功能,对极性分子 NH_3 有很高的亲和力,即使在低相对湿度、较高温度条件下仍能有效吸附^[17-8],因此将沸石应用到堆肥工程中,

能有效减少氨挥发损失。而且沸石是一种良好的土壤改良剂,堆肥中添加适量的沸石不会对土壤和作物产生不良影响。与传统的堆肥调理剂相比,沸石添加剂具有价格低廉、安全无毒害、富含微量元素等优点,在堆肥工程中具有较为广阔的应用前景。

4 结论

氨挥发主要发生在污泥堆肥的高温阶段(试验前9 d)。沸石作为添加剂,可以使氨挥发高峰晚1 d出现。堆肥中添加5%和10%的沸石,与对照相比显著降低了氨挥发峰值28.7%和43.1%,降低氨挥发累积速率27.9%和48.7%。

堆肥中添加沸石对堆体温度、pH值、EC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均有显著影响。添加沸石,使堆体温度高温期持续时间缩短3 d;降低堆肥中、后期堆体的温度,降幅为0.17~13.5℃;增加了堆体0.09~0.22个pH单位;维持堆肥更低电导率(1 876.7~2 636.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),降低堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 9.07%~22.2%。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于全国城镇污水处理设施2011年第四季度建设和运行情况的通报[EB/OL]. http://www.mohurd.gov.cn/zcfg/jsbwj_0/jsbwjcsjs/201203/t20120320_209157.html, 2012-02-15.
- [2] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. ZHAO Qing-xiang. Technology of sewage sludge resource[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2002.(in Chinese)
- [3] Delaune P B, Moore P A, Daniel T C, et al. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry litter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 728-734.
- [4] Liang Y, Leonard J J, Feddes J J, et al. A simulation model of ammonia volatilization in composting[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(5): 1667-1680.
- [5] Peigne J, Girardin P. Environmental impacts of farm-scale composting practices[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2004, 153(1): 45-68.
- [6] 黄红英, 常志州, 朱万宝, 等. 调理剂在猪粪中的除臭及保氮作用[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 169-171. HUANG Hong-ying, CHANG Zhi-zhou, ZHU Wan-bao, et al. Odor reduction and inhibitor of nitrogen losses by chemical amendments during composting pig manure[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(3): 169-171.(in Chinese)
- [7] Mark E Davis, Raul F Lobo. Zeolite and molecular sieve synthesis[J]. *Chem Mater*, 1992, 4(4): 756-768.
- [8] 阎子峰. 纳米催化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. YAN Zi-feng. Nano catalytic technology[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2003.(in Chinese)
- [9] Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74: 125-133.
- [10] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(2): 131-137.
- [11] 王卫平, 汪开英, 薛智勇, 等. 不同微生物菌剂处理对猪粪堆肥中氨挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 693-697. WANG Wei-ping, WANG Kai-ying, XUE Zhi-yong, et al. Effects of microbial agents on NH_3 emission during pig manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 693-697.(in Chinese)
- [12] 顾文杰, 张发宝, 徐培智, 等. 堆肥反应器中硫磺对牛粪好氧堆肥的保氮效果研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 224-230. GU Wen-jie, ZHANG Fa-bao, XU Pei-zhi, et al. Nitrogen conservation by adding sulfur to dairy manure in compost bioreactors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 224-230.(in Chinese)
- [13] 贾程, 张增强, 张永涛. 污泥堆肥过程中氮素形态的变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11): 2269-2276. JIA Cheng, ZHANG Zeng-qiang, ZHANG Yong-tao. Transformation of nitrogen forms during co-composting of sewage sludge and wheat straw[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(11): 2269-2276.(in Chinese)
- [14] 张曦, 吴为中, 温东辉, 等. 氨氮在天然沸石上的吸附及解吸[J]. 环境化学, 2003, 22(2): 166-171. ZHANG Xi, WU Wei-zhong, WEN Dong-hui, et al. Adsorption and desorption of ammonia-nitrogen onto natural zeolite[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(2): 166-171.(in Chinese)
- [15] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 不同畜禽粪便堆肥过程中有机氮形态的动态变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 930-936. BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamic changes of organic nitrogen forms during the composting of different manures[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 930-936.(in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 李艳霞, 薛澄泽, 陈同斌. 污泥和垃圾堆肥用作林木育苗基质的研究[J]. 农村生态环境, 2000, 16(1): 60-63. LI Yan-xia, XUE Cheng-ze, CHEN Tong-bin. Use of sewage sludge and refuse compost as medium for sapling cultivation[J]. *Rural Eco-environment*, 2000, 16(1): 60-63.(in Chinese)
- [18] 李春萍, 李国学, 李玉春, 等. 北京南宫静态堆肥隧道仓不同区间的垃圾堆肥腐熟度模糊评价[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 201-206. LI Chun-ping, LI Guo-xue, LI Yu-chun, et al. Fuzzy mathematics based-evaluation of municipal solid waste compost maturities in different spaces in static tunnel from Nangong compost plant[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 201-206.(in Chinese)
- [19] 李冰, 王昌全, 江连强, 等. 有机辅料对猪粪堆肥中氨气挥发的抑制效应及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):

- 987-993.
- LI Bing, WANG Chang-quan, JIANG Lian-qiang, et al. Inhibitory effect of auxiliary organic materials on ammonia volatilization in composting and the influencing factors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 987-993.(in Chinese)
- [20] 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.(in Chinese)
- [21] Fang M, Wong J W C, Ma K K, et al. Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: nutrient transformations[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 67(1): 19-24.
- [22] Mahimairaja S, Bolan N S, Hedley M J, et al. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment[J]. *Bioresource Technology*, 1994, 47(3): 265-273.
- [23] 熊建军, 刘淑英, 邹国元, 等. 高温堆肥过程中除臭保氮技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 444-448.
- XIONG Jian-jun, LIU Shu-ying, ZOU Guo-yuan, et al. Research progress on deodorizing and reducing nitrogen loss from high temperature compost system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 444-448.(in Chinese)