

雷平, 刘标, 尹红梅. 过磷酸钙在病死猪堆肥中保氮效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 266-271.

LEI Ping, LIU Biao, YIN Hong-mei. Effects of Calcium Superphosphate Additive on Nitrogen Conservation During Dead-pig Composting[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3): 266-271.

过磷酸钙在病死猪堆肥中保氮效果研究

雷平, 刘标, 尹红梅

(湖南省微生物研究院, 湖南长沙 410009)

摘要:为研究不同比例的过磷酸钙添加剂对病死猪堆肥过程中氮素转化和保氮效果的影响,本试验将病死猪尸体、水稻秸秆按一定比例混合后,设置未添加(CK)、添加5%(T1)和10%(T2)过磷酸钙3个处理,进行了为期30d的堆肥发酵试验。结果表明,各堆体大于50℃的高温均能保持10d以上,满足堆肥无害化的要求;添加初始物料鲜重的5%和10%的过磷酸钙对降低堆肥的pH值,增加堆肥的铵态氮、硝态氮、全氮含量均具有明显的效果。堆肥结束时,T1、T2处理的堆肥产品的总氮含量分别比对照高10.7%、10.1%,保氮效果显著。添加5%过磷酸钙处理的堆肥产品在第14d时种子发芽指数达101.4%,高于对照,过磷酸钙促进了病死猪堆肥的快速腐熟。在病死猪堆肥中添加适量的过磷酸钙,可以降低堆体氮的损失,在堆肥工程中具有较广阔的应用前景。

关键词:过磷酸钙;病死猪堆肥;保氮效果

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)03-0266-06

doi: 10.13254/j.jare.2016.0269

Effects of Calcium Superphosphate Additive on Nitrogen Conservation During Dead-pig Composting

LEI Ping, LIU Biao, YIN Hong-mei

(Hunan Microbiology Institute, Changsha 410009, China)

Abstract:To study the effects of calcium superphosphate additive on nitrogen conservation, an experiment of 30 days dead-pig composting was carried out. Three mixtures were treated with different amount of calcium superphosphate additive of 0%(CK), 5%(T1) and 10%(T2). The results showed that each composte temperature higher than 50℃ remained above 10 days, meeting the requirements of hygiene index about the compost rotten. The pH of composting with calcium superphosphate was significantly decreased, while $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, total nitrogen contents were significant higher than the control. 5% and 10% calcium superphosphate addition increased the total nitrogen contents by 10.7%, 10.1%, respectively. The seed germination index (GI) of 5% calcium superphosphate addition was up to 101.4% on the 14th day, which was significant higher than the contrast. It demonstrated that calcium superphosphate could accelerate maturity during dead-pig composting. Thus, calcium superphosphate as an additive in dead-pig composting could decrease nitrogen losses, which would bring prospects of application in dead-pig composting.

Keywords: calcium superphosphate; dead-pig composting; nitrogen conservation

我国是畜牧业大国,据统计,2015年我国生猪存栏4.51亿头,出栏7.08亿头。生猪集约化高密度的养殖模式使动物染疫和死亡的概率大大增加,据统计,每年因各类疾病引起猪的死亡率占养殖总数的8%~

12%^[1],产生了数量巨大的染疫动物尸体。病死猪携带大量的病原微生物,对人类及畜牧业的健康发展造成了严重威胁^[2-3]。如何使这些动物尸体得到安全有效的处理,是目前规模养殖过程中急需解决的问题。近年来,国内外相继开展了堆肥处理死畜禽的相关研究^[4-6],堆肥法相对于焚烧、掩埋等方法,设备简单,对环境污染小,且堆肥产品可以作为有机肥料,已成为当前死畜禽尸体(因重大动物疫病及人畜共患病死亡的动物尸体除外)无害化和资源化处理的一种方法。与畜禽

收稿日期:2016-11-09

基金项目:湖南省科技重点研发计划(2016NK2208);湖南省生猪产业技术体系生猪产业规模养殖与环境控制岗位项目

作者简介:雷平(1965—),男,湖南常德人,助理研究员,从事农业微生物的基础与应用研究。E-mail: 280795307@qq.com

粪便堆肥相同,病死猪堆肥过程中也存在氮素损失和恶臭,不仅造成空气污染,而且降低了肥料中的氮素养分含量^[7-8]。因此,在堆肥过程中如何减少氮素损失成为研究者关注的热点问题。

现有的研究表明,合理地添加过磷酸钙对减少畜禽粪便堆肥氮素的损失能够起到一定的作用。林小凤等^[9]在堆肥原料中添加占总物料干质量 10.0%~15.7%的过磷酸钙,可减 60%~85%的总氮质量损失。Pre-dotova 等^[10]发现在粪便堆放时添加物料干质量 33%的磷矿石(过磷酸钙的生产原料)可减少 50%的氮素损失;胡明勇等^[11]研究表明,在猪粪-稻草堆肥中,添加 8%的过磷酸钙具有较好的保氮效果;罗一鸣等^[12]在初始物料中添加干质量 3.3%~13.2%的过磷酸钙添加剂对减少堆体碳、氮损失,降低温室气体排放均有明显效果。病死猪尸体具有水和氮含量高、碳含量低、质地密度大的特点,与畜禽粪便为主的堆肥原料性质相差较大,过磷酸钙对病死猪堆肥过程中除臭保氮效果尚未有相关研究报道。因此,本文采用模拟堆肥试验,研究了不同添加量的过磷酸钙在病死猪-稻草堆肥过程中的保氮效果,旨在为病死猪堆肥资源化处理提供科学依据,初步探讨其在堆肥工程实践中的环境效益。

1 材料与方法

1.1 堆肥原料

试验在湖南原生物科技股份有限公司进行,堆肥物料主要是病死猪和水稻秸秆,试验前对病死猪和水稻秸秆进行粉碎,物料的基本理化性质如表 1 所示。添加剂过磷酸钙购于国药集团化学试剂有限公司。

表 1 堆肥原料的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the tested raw materials

原料 Raw material	含水率 Moisture/%	全氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹	全碳 Total carbon/g·kg ⁻¹	C/N/%
病死猪 Dead pig	69.8	37.3	396.3	10.6
水稻秸秆 Rice straw	11.9	9.1	368.2	40.5

1.2 试验设计

试验于 2014 年 3—4 月在室内通风大棚内进行,共计 30 d。堆肥基质按病死猪和水稻秸秆 3:1(鲜重质量比)进行混合,堆体总质量为 360 kg,堆肥时调节 C/N 约为 25:1,含水量约为 55%。本试验设 3 个处理:(1)对照(CK):不添加过磷酸钙仅堆肥原料;(2)5%

添加组(T1):堆肥原料+18 kg 过磷酸钙;(3)10%添加组(T2):堆肥原料+36 kg 过磷酸钙。过磷酸钙在堆料搅拌过程中均匀撒到原料中,混匀后堆成约 1.2 m×1.2 m×0.8 m 的堆体,每个处理重复 3 堆。在堆肥第 7、14、21 d 进行翻堆,分别在堆肥的第 0、3、6、9、12、15、20、25、30 d 于表层、中层、底层的 3 个点采样,分别混合均匀,各处理每次取样约 500 g。

1.3 测定项目与方法

(1)温度:每日中午 11:30 分别用水银温度计测定堆体中心温度和环境温度。

(2)pH 值、全氮(TN)含量:参照中华人民共和国农业行业标准《NY 525—2012》中的标准方法测定。

(3)水溶性铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N):分别采用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定^[13]。

(4)种子发芽指数(GI)的测定:取 10 g 鲜样加入 100 mL 蒸馏水,振荡 1 h。吸取 5 mL 滤液,加入到铺有 2 张滤纸的 9 cm 培养皿中,每个培养皿均匀放入 20 粒萝卜种子,30 °C 下暗培养 48 h,测定发芽率和根长,同时用蒸馏水作为对照^[14]。

其计算公式为:

$$GI = (\text{堆肥处理的种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{对照的种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100\%$$

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 整理及作图,利用 SPSS 18.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 堆肥温度变化

在堆肥过程中,堆肥温度变化是反映发酵是否正常进行的最直观和最重要的指标。从图 1 可以看出,在整个堆肥过程中,堆肥物料的中心温度均高于环境温度,3 个不同处理的堆温变化趋势基本一致。CK 和添加了 5%过磷酸钙 T1 组在堆肥的第 4 d 达到高温期(>50 °C),最高温度分别为 64 °C 和 63 °C;而添加了 10%过磷酸钙的 T2 组在堆肥第 5 d 达到高温期,最高温度为 63 °C。3 个不同处理的堆体高温(>50 °C)维持时间均>10 d,符合高温堆肥的无害化要求(GB 7959—2012)。3 个处理间温度差异不明显,说明添加过磷酸钙对堆肥升温无明显影响,均能实现堆肥的高温腐熟过程。

2.2 堆肥 pH 值的变化

堆肥 pH 值的变化主要是由堆体中微生物的活动及其产生的代谢产物引起的。堆体 pH 值随时间的

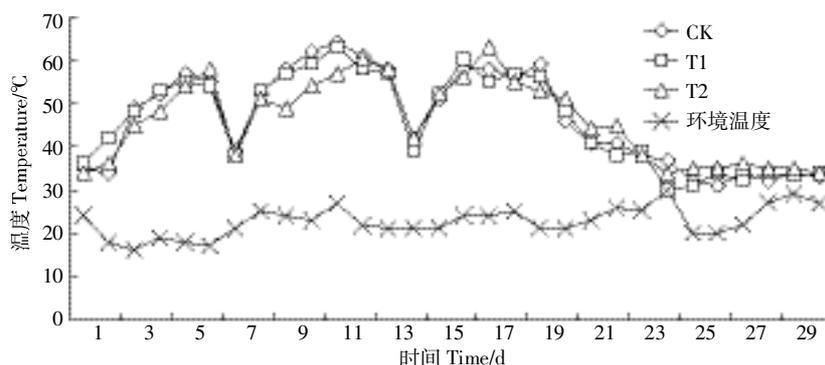


图 1 不同添加量的过磷酸钙对堆肥温度的影响

Figure 1 Temperature changes in the composting with different amounts of calcium superphosphate

变化如图 2 所示,各组处理的 pH 值变化趋势基本一致,都呈现出先上升后下降,然后趋于稳定的趋势。堆肥起始时,添加了过磷酸钙的堆体的 pH 值显著低于对照堆体的 pH 值,随着堆肥的进行,由于微生物分解有机氮产生大量的氨,使得 pH 值增大,CK、T1、T2 组 pH 值最大值分别出现在第 6、9、6 d,分别为 8.63、8.24、8.11。此后,堆体中氮素的氨化作用减弱而硝化作用增强,因此堆体的 pH 值下降并保持至堆肥结束。T1、T2 处理由于加入了过磷酸钙,堆肥结束时, pH 值显著低于对照处理。

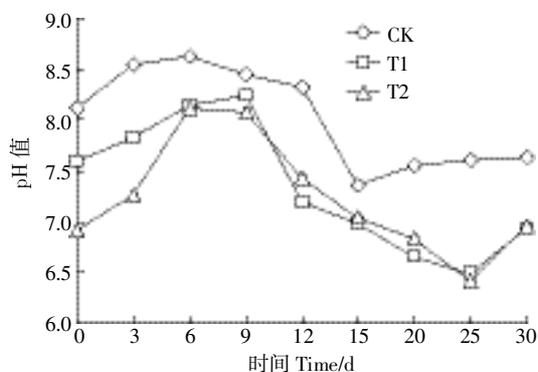


图 2 不同添加量的过磷酸钙对堆肥 pH 值的影响

Figure 2 pH changes in the composting with different amounts of calcium superphosphate

2.3 堆肥中铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量的变化

堆体中的铵态氮含量(NH₄⁺-N)与氨气的释放密切相关,是氮素损失的主要来源。铵态氮含量的变化如图 3 所示,3 个处理的铵态氮的含量均表现为先上升后下降的趋势。在堆肥的前 6 d,各个处理的铵态氮含量无显著性差异($P>0.05$),随着堆肥的进行,含氮有机物大量转化 NH₄⁺-N,因此铵态氮含量大幅增加。

CK、T1、T2 处理分别在第 15、12、12 d 时达到最大值,分别为 2 018.6、2 634.7、2 597.6 mg·kg⁻¹。随后,含量缓慢降低,堆肥结束时,各组的铵态氮含量分别降低至 1 265.7、1 796.4、1 759.5 mg·kg⁻¹,T1、T2 处理的铵态氮含量显著高于对照组($P<0.05$),说明病死猪堆肥中添加 5%和 10%的过磷酸钙可以增加堆肥中铵态氮的含量。

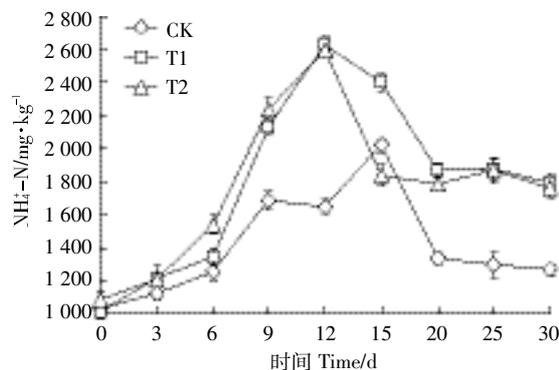


图 3 不同过磷酸钙添加量对堆肥 NH₄⁺-N 含量的影响

Figure 3 Variation of soluble NH₄⁺-N content in the composting with different amounts of calcium superphosphate

与 NH₄⁺-N 相比,各处理的 NO₃⁻-N 含量在堆肥初期均较低,堆肥的第 15~20 d 快速升高,之后趋于稳定(图 4)。在堆肥前期,由于堆体高温抑制了硝化细菌的生长,各个处理堆体的硝态氮含量变化不大,且没有显著差异($P>0.05$)。后期,由于堆肥温度降低,硝化作用加强,铵态氮转化为硝态氮,因此硝态氮含量急剧上升。至堆肥结束时,CK、T1、T2 处理的 NO₃⁻-N 含量比堆肥初期分别增加了 184%、241%、234%,T1、T2 处理的增幅显著高于对照处理($P<0.05$)。

2.4 堆肥中全氮(TN)含量变化

全氮是判断堆肥品质的一个重要指标。如图 5 所

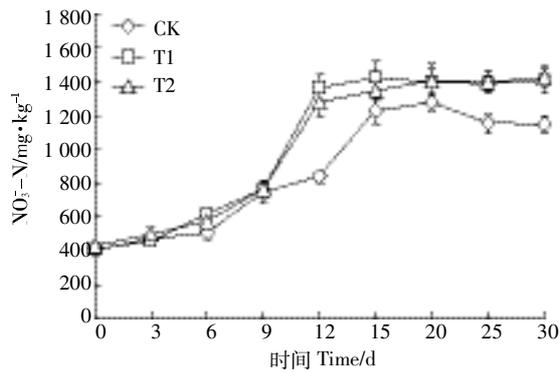
图4 不同过磷酸钙添加量对堆肥NO₃-N含量的影响

Figure 4 Variation of soluble NO₃-N content in the composting with different amounts of calcium superphosphate

示,各处理的全氮含量变化趋势大致相同,0~15 d呈下降趋势,在15~25 d略有升高,25 d后保持稳定。堆肥开始时,各处理堆体的全氮含量基本相同($P>0.05$);结束时,CK、T1、T2处理的全氮含量分别为17.7、19.3、19.2 g·kg⁻¹,比堆肥初期分别降低了28.0%、20.0%、21.7%,添加过磷酸钙的处理T1和T2的全氮含量分别比对照处理高10.7%、10.1%,显著高于对照($P<0.05$)。这说明添加5%或10%的过磷酸钙,可以降低氮素损失,起到一定的保氮作用。

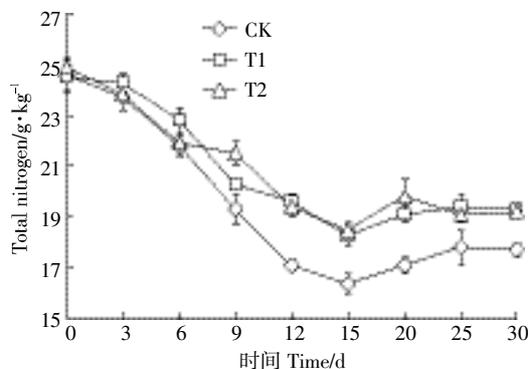


图5 不同过磷酸钙添加量对堆肥全氮含量的影响

Figure 5 Total nitrogen content in the composting with different amounts of calcium superphosphate

2.5 堆肥中添加过磷酸钙对种子发芽指数(GI)的影响

堆肥产品的种子发芽指数是评价堆肥产品是否腐熟的重要指标之一。一般认为,当种子发芽指数大于80%时,说明堆肥产品对植物无毒性,完全达到腐熟^[14]。从表2可以看出,在堆肥第14 d时,T1处理的GI达到101.4%,而CK和T2处理的GI仍小于80%。随着堆肥的进行,各组的GI逐渐增大,至堆肥结束

表2 添加过磷酸钙对种子发芽指数的影响

Table 2 Germination index(GI) in the composting with different amounts of calcium superphosphate

处理 Treatments	种子发芽指数(GI)/%			
	7 d	14 d	21 d	30 d
CK	61.6±7.8a	69.9±8.9a	108.6±8.7a	121.2±4.8a
T1	70.5±9.4a	101.4±6.7b	112.8±7.6a	117.6±8.3a
T2	60.3±5.8a	72.1±6.9a	104.9±7.3a	116.8±7.7a

注:表中不同小写字母表示在同一堆肥时间各处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters mean statistically significant differences among different treatments at the same composting time at the 0.05 probability level.

时,各处理的GI均大于110%,产品达到完全腐熟。由此说明,在堆肥中加入5%或10%的过磷酸钙不会使堆肥产品产生毒性,堆肥可以正常腐熟,但添加5%过磷酸钙的堆体腐熟时间早于对照处理和添加10%过磷酸钙的堆体。

3 讨论

目前,过磷酸钙是堆肥除臭保氮中应用较多的一种化学添加剂^[9,11-12],由于其含有游离酸,可以将堆肥原料的pH值由微碱性调至微酸性,从而减少氨的挥发,减少氮素损失。本试验表明,以病死猪尸体和水稻秸秆为原料进行的高温堆肥,在堆肥中添加5%过磷酸钙(T1)和10%过磷酸钙(T2),各处理达到高温的时间、堆体最高温度及高温维持天数无显著性差异,均符合高温堆肥的无害化要求(GB 7959—2012),但能显著降低堆肥的pH值。黄懿梅等^[15]的试验中,添加过磷酸钙最高可降低堆肥0.44个pH单位,而本实验中添加5%和10%过磷酸钙最高可降低0.71、0.68个pH单位,由此可见添加过磷酸钙在病死猪堆肥中对pH值的降低效果更明显。

堆肥过程中氮素的形态主要有有机氮、硝态氮、铵态氮和氨气等,各种形态的氮素发生复杂的转化,这一过程主要是在微生物(主要是氨化细菌和硝化细菌)的作用下完成的^[16]。本试验中,铵态氮含量均先升高后降低,而硝态氮含量逐渐升高,全氮含量先降低后期略有升高,这与王海候等^[17]、张广杰^[18]、徐路魏等^[19]研究结果一致。这可能是由于前期堆体处于高温期,氨化细菌数量相对较多,堆肥物料快速分解,有机氮大部分转化为铵态氮,导致全氮含量快速降低,铵态氮含量大量增多;后期随着堆肥温度降低,硝化细菌数量大量繁殖,硝化作用增强,铵态氮转化为硝态

氮,故后期硝态氮含量大量上升^[20]。同时,由于腐殖化作用大于矿化作用,氨气挥发减少,堆体的质量减轻,使得全氮相对含量趋于稳定并略有回升。

堆肥过程中,氨气挥发是造成氮素损失的主要原因,而氨气的挥发主要与堆体的温度、pH 值、铵态氮浓度等有关^[12,21]。本试验堆肥结束时,添加过磷酸钙处理堆体的(T1、T2)铵态氮、硝态氮、全氮含量均显著高于对照组(CK),这可能是添加过磷酸钙降低了堆肥的 pH 值,从而抑制 NH₄⁺-N 向氨气的转化,同时过磷酸钙将高温期产生的 NH₄⁺-N 以铵盐的形式固定下来,因此,很好地控制了氮素的损失。与林小凤等^[9]、翁俊基^[22]研究结果相比,本试验添加 5%和 10%的过磷酸钙在减少氮素损失上的效果要差,这可能与堆肥原料性质及堆肥环境条件的差异等有关,在今后的研究中有必要进一步优化堆肥工艺、过磷酸钙的最佳添加量及添加时间。

随着堆肥的进行,堆肥物料中抑制作物生长的物质逐渐消失^[23],同时随着氨气的挥发和重金属的固定,各处理的 GI 逐渐增大。堆肥结束时,各处理的 GI 均大于 110%,达到堆肥腐熟的标准。但添加 5%过磷酸钙处理的 GI 在第 14 d 显著高于对照处理和添加 10%过磷酸钙的处理,说明添加适量的过磷酸钙可以促进堆体的腐熟,但添加量过多时,堆体腐熟速度又会减缓,这与罗一鸣等^[12]的研究结果类似,推测原因可能是添加 5%过磷酸钙更有利于堆肥腐熟微生物的生长繁殖。

4 结论

在以病死猪尸体和水稻秸秆为原料进行的堆肥中添加 5%和 10%的过磷酸钙,对降低堆肥的 pH 值,增加堆肥的铵态氮、硝态氮、全氮含量均具有明显的效果。综合考虑堆肥的成本及腐熟时间,添加初始物料鲜重的 5%的过磷酸钙能够显著降低堆肥的总氮损失,加速堆肥腐熟,而且过磷酸钙本身是一种磷肥,有利于提高堆肥的品质。

参考文献:

[1] 朱秀君, 常 见, 刘文科. 台湾地区病死动物无害化处理及再利用[J]. 北方牧业, 2014(13):16.
ZHU Xiu-jun, CHANG Jian, LIU Wen-ke. Utilization and treatment of the technology of harmless treatment of dead animals in Taiwan[J]. *Animal Husbandry in Northern Area*, 2014(13):16.(in Chinese)
[2] 文利侠, 李舒强. 动物源性食品安全问题与对策[J]. 畜牧兽医杂志, 2013, 32(1):69-71.

WEN Li-xia, LI Shu-qiang. Animal derived food safety problems and countermeasures[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2013, 32(1):69-71.(in Chinese)
[3] 滕腾飞, 吴志明, 刘阳利, 等. 热辅快速生物发酵分解工艺无害化处理病死猪尸体效果评估[J]. 动物医学进展, 2015, 36(5):81-85.
CHEN T F, WU Z M, LIU Y L, et al. Evaluation of effect on harmless treatment of dead pig carcass by process of rapid biological fermentation decomposition[J]. *Progress in Veterinary Medicine*, 2015, 36(5):81-85.(in Chinese)
[4] Eamens G J, Dorahy C J, Muirhead L, et al. Bacterial survival studies to assess the efficacy of static pile composting and above ground burial for disposal of bovine carcass[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2011, 110(6):1402-1413.
[5] Berge A C, Glanville T D, Millner P D, et al. Methods and microbial risks associated with composting of animal carcasses in the United States[J]. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 2009, 234(1):47-56.
[6] 陶秀萍, 董红敏. 畜禽尸体堆肥无害化处理技术现状[J]. 现代畜牧兽医, 2014(7):25-29.
TAO Xiu-ping, DONG Hong-min. Livestock and poultry carcass composting: A review[J]. *Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2014(7):25-29.(in Chinese)
[7] 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)
[8] Petersen S O, Sommer S G. Ammonia and nitrous oxide interactions: Roles of manure organic matter management[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166(1):503-513.
[9] 林小凤, 李国学, 任丽梅, 等. 氯化铁和过磷酸钙控制堆肥氮素损失的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1662-1666.
LIN Xiao-feng, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. Effect of FeCl₃ and Ca(H₂PO₄)₂ as amendments on reducing nitrogen loss during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1662-1666. (in Chinese)
[10] Predotova M, Schlecht E, Buerkert A. Nitrogen and carbon losses from dung storage in urban gardens of Niamey, Niger[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(1):103-114.
[11] 胡明勇, 刘 强, 陈雄鹰, 等. 两种钙化合物在猪粪-稻草堆肥中除臭及保氮效果研究[J]. 湖南农业科学, 2009(7):51-54.
HU Ming-yong, LIU Qiang, CHEN Xiong-ying, et al. Effects of two kinds of calcium compounds on NH₃ emissions and nitrogen conservation in the pig manure composting.[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009(7):51-54. (in Chinese)
[12] 罗一鸣, 李国学, Framl Schuchardt, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):235-242.
LUO Yi-ming, LI Guo-xue, Frank Schuchardt, et al. Effects of additive superphosphate on NH₃, N₂O and CH₄ emissions during pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural En-*

- gineering*, 2012, 28(22):235-242. (in Chinese)
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2000:107-160.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000:107-160. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 黄懿梅, 曲东, 李国学. 调理剂在鸡粪锯末堆肥中的保氮效果[J]. 环境科学, 2003, 24(2):156-160.
HUANG Yi-mei, QU Dong, LI Guo-xue. Effect of adding amendments on preserving nitrogen during chicken manure and saw composting[J]. *Environment Science*, 2003, 24(2):156-160. (in Chinese)
- [16] 马丽红, 黄懿梅, 李学章, 等. 牛粪堆肥化中氮素形态与微生物生理群的动态变化和耦合关系[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2674-2679.
MA Li-hong, HUANG Yi-mei, LI Xue-zhang, et al. Changes of nitrogen forms and microbial physiological group diversity and their relations during composting of cow manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2674-2679. (in Chinese)
- [17] 王海候, 沈明星, 涂荣文, 等. 生物质炭对伊乐藻堆肥过程氨挥发的作用效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2266-2272.
WANG Hai-hou, SHEN Ming-xing, TU Rong-wen, et al. Effect of biochar on ammonia volatilization during elodea composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2266-2272. (in Chinese)
- [18] 张广杰. 添加不同比例橡木炭对猪粪好氧堆肥的形象研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
ZHANG Guang-jie. Effect of different proportions of oak charcoal on composting of pig manure with rice husk under aerobic condition[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [19] 徐路魏, 王旭东. 生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1160-1166.
XU Lu-wei, WANG Xu-dong. Effect of biochar on nitrogen transformation in vegetable wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1160-1166. (in Chinese)
- [20] 许修宏, 赵晓雨, 李洪涛, 等. 牛粪堆肥中氮素转化关键菌群的动态变化影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(8):26-31.
XU Xiu-hong, ZHAO Xiao-yu, LI Hong-tao, et al. Dynamic variation of key nitrogen transformation microflora in cow manure compost[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(8):26-31. (in Chinese)
- [21] 许俊香, 刘本生, 孙钦平, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1):81-86.
XU Jun-xiang, LIU Ben-sheng, SUN Qin-ping, et al. Effects of zeolite addition on ammonia volatilization and influence factors in sludge composting[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(1):81-86. (in Chinese)
- [22] 翁俊基. 过磷酸钙在猪粪堆肥过程中的保氮效果研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(8):4528-4529.
WENG Jun-ji. Nitrogen conservation of calcium superphosphate in swine manure compost[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2012, 40(8):4528-4529. (in Chinese)
- [23] Hachicha R, Hachicha S, Trabelsi I, et al. Evolution of the fatty fraction during co-composting of olive oil industry wastes with animal manure: Maturity assessment of the end product[J]. *Chemosphere*, 2009, 75(10):1382-1386.