

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.020

粉煤灰和猪粪好氧混合堆肥过程中养分转化研究*

李荣华 张广杰 秦睿 张增强

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 以猪粪为堆肥原材料,以玉米秸秆粉为调理剂,并添加干质量分数为0、2.5%、5.0%、7.5%和10%的粉煤灰进行90 d好氧堆肥,研究不同用量粉煤灰对猪粪堆肥过程中养分转化的影响。结果表明:添加粉煤灰能提高堆体的pH值,但在后期对电导率(EC)的增加有一定的抑制;碳氮比随着堆肥时间的延长而降低,而总氮(TN)则相反;当粉煤灰质量分数达10%时,在60d后堆体TN明显降低;添加粉煤灰对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 无明显影响,而所有添加粉煤灰均会抑制堆肥中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的生成,且与粉煤灰用量呈正相关;添加粉煤灰对总磷(TP)和总钾(TK)的影响不大,但会抑制雪里蕻根部的生长。结合发芽率试验结果可以认为,90 d的试验中所添加的粉煤灰对猪粪堆肥的腐熟没有影响。

关键词: 粉煤灰 猪粪 好氧 堆肥 养分转化

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0100-06

Nutrient Transformation during Swine Manure Co-composting with Flyash under Aerobic Conditions

Li Ronghua Zhang Guangjie Qin Rui Zhang Zengqiang

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

Swine manure was mixed with corn stalk powder as a bulking agent, and the mixtures were amended with flyash at 0, 2.5%, 5.0%, 7.5% and 10% and composted for 90 days. Addition of flyash raised the pH value of the swine manure compost throughout the composting period, but significant inhibited the rise of electricity conductivity during the later period with the ratio of flyash increasing. C/N ratio decreased according to composting time, whereas total N showed an opposite trend for all treatments except 10% flyash was amended. There was no significant loss of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ during the thermophilic phase by ash amendment. While, addition of flyash also inhibited the nitrification process as indicated by the lower soluble $\text{NO}_3\text{-N}$ content in ash-amended swine manure composts but had no effect on TP and TK increasing. The GI and germination rate of potherb mustard (*Ardisiasquamulosa presl*) seed increased with composting time, while the root growth was significant inhibited when flyash was amended and the germination rate indicated that flyash amendment did not affect compost maturity in 90 days composting.

Key words Flyash, Swine manure, Aerobic, Compost, Nutrient transformation

引言

随着我国畜禽养殖业的快速发展,畜禽养殖已向区域化、集约化方向发展,畜禽养殖场也由农村、

牧区向城市近郊转移,导致养殖废物局部大量集中,加重了垃圾处理系统的压力。经估算,仅2003年全国畜禽粪尿排放量为31.90亿t,远超过当年工业固体废弃物10.00亿t^[1];到2010年,全国畜禽粪便的

收稿日期:2011-06-27 修回日期:2011-07-12

*陕西省攻关资助项目(2010K01-01)

作者简介:李荣华,博士生,主要从事污染环境修复研究,E-mail:rh.lee@nwsuaf.edu.cn

通讯作者:张增强,教授,博士生导师,主要从事固体废弃物资源化处理研究,E-mail:zhangzq58@126.com

排放量达到了45亿t^[2]。

另外,随着养殖业的发展,畜禽养殖业从分散饲养发展到规模化养殖,高蛋白饲料和饲料添加剂的广泛使用^[3],使得猪粪中的N、P、K等植物营养成分大量增加^[4],这促使了畜禽粪便的农业使用。但研究表明,目前我国的猪粪中重金属含量普遍偏高^[5-8]。若畜禽粪便、污泥等含有大量重金属的物质直接进行农田施用,则极有可能导致土壤甚至地下水重金属污染,因此需要对其进行必要的处理,并合理施用^[9]。

为了减小畜禽粪便等造成的潜在环境风险,许多学者^[10-12]尝试向猪粪堆肥中添加不同的重金属钝化剂,如沸石、海泡石、粉煤灰、膨润土、磷灰石等,并进行了大量的研究。但有关添加不同用量粉煤灰进行猪粪堆肥过程中养分转化的研究还少有报道。本试验以猪粪和玉米秸秆粉为堆肥原料,添加不同用量粉煤灰进行好氧堆肥,研究粉煤灰对猪粪堆肥过程中养分转化的影响,为规模化猪粪堆肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥试验装置

堆肥试验装置如图1所示,为自行设计的翻转式好氧堆肥反应器。外形尺寸为0.4 m×0.4 m×0.7 m的长方体,有效容积为0.1 m³,用厚度为1.0 cm的PVC板粘接,由密闭反应器、进出料口、保温层(4.0 cm厚泡沫塑料板)、布气系统、通气自动控制系统、进排气管、温度系统和轴支架系统等组成。

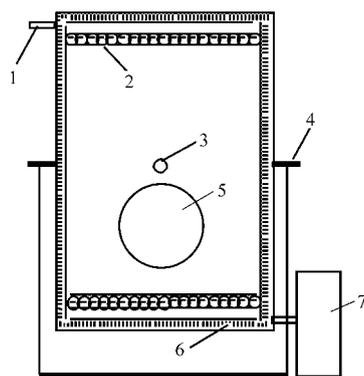


图1 堆肥试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of composting reactor

1. 进排气管 2. 布气系统 3. 测温系统 4. 中轴支架系统
5. 进出料口 6. 保温层 7. 通气自动控制系统

1.2 堆肥制作

选取杨凌职业技术学院种猪场的新鲜猪粪作为研究对象,将采自杨凌张家岗农田的玉米秸秆粉碎后,取粒径小于5 mm粉末作为调理剂,按照猪粪与秸秆(干质量)质量比0.5:1的比例进行堆置,并添加不同干质量分数(0、2.5%、5.0%、7.5%和10.0%)的粉煤灰,调节含水率65%左右。将其充分混匀,并保证混合物料中颗粒物粒径小于1.0 cm,然后把混合物料及时装入翻转式堆肥器,进行强制通风。

各处理分别于第1、3、7、14、21、30、45、60、75和90天采样,取样前先翻转堆肥器使物料混匀,然后多点取样,每次采样量为1 kg。样品分为2份,一份300 g鲜样储存于4℃冰箱中待用;另一份700 g在40℃低温干燥,在陶瓷研钵中研磨后,过0.15 mm孔径的尼龙筛,保证样本具有很好的代表性。

表1 堆肥混合物料初始性质

Tab. 1 Initial properties of composting materials

物料	含水率/%	有机质质量分数/%	总磷质量比/g·kg ⁻¹	总氮质量比/g·kg ⁻¹	总钾质量比/g·kg ⁻¹	碳氮比	pH值
猪粪	78.89	73.01	15.130	29.82	8.16	13.60	8.37
玉米秸秆	10.07	94.18	1.140	1.14	28.42	44.74	6.75
粉煤灰	0.52		1.698		3.24		11.67

1.3 测定指标及方法

取鲜样按水样质量比10:1振荡3 h后离心过滤,取滤液电极法测定pH值和电导率;铵态氮、硝态氮、总凯氏氮、总磷、总钾、有机质的测定方法参见文献[13]。进行雪里蕻种子发芽率和种子发芽指数(GI)测定时,在塑料离心管中称取一定量的堆肥鲜样,按照固液质量比1:3的比例加入去离子水,在(25±0.5)℃下振荡4 h后离心,将上清液过0.45 μm滤膜后,留取滤液备用。然后在事先经过高温灭菌的玻璃培养皿中,平铺一张经过灭菌的无磷定量滤纸,均匀地放上20粒雪里蕻种子,然后向

滤纸加入5 mL滤液。在(25±0.5)℃培养箱中培养96 h后计算雪里蕻种子发芽数目,并测定根长。试验中以去离子水代替堆肥滤液作为对照,所有试验设置4个平行,发芽率计算公式为

$$R = \frac{N_a}{N_b} \times 100\%$$

式中 N_a ——堆肥处理的发芽种子数目
 N_b ——对照处理的发芽种子数目
种子发芽指数(GI)计算公式为

$$R_{GI} = \frac{N_a S_a}{N_b S_b}$$

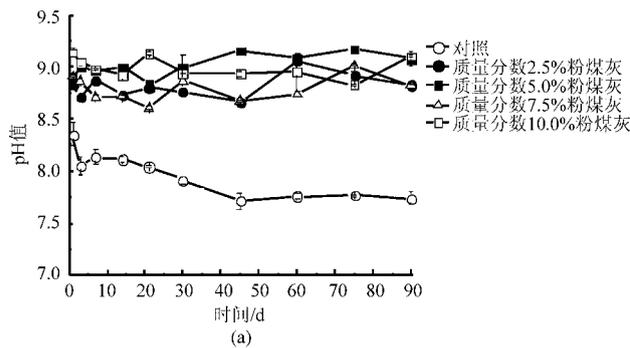
式中 S_a ——堆肥处理发芽种子平均根长, mm
 S_b ——对照处理发芽种子平均根长, mm

2 结果与讨论

2.1 pH 值和电导率的变化

pH 值是堆肥过程中的重要参数之一, pH 值和电导率的变化如图 2 所示。

由图 2a 可见, 各处理中 pH 值的变化均在最初几天有一定的降低趋势, 除了对照处理 pH 值持续降低并最终稳定在 pH 值 7.88 以外, 其余添加粉煤灰的各处理中 pH 值的变化保持在 8.55~9.10 范围内波动, 直至 90 d 堆置结束。但总体而言, 堆肥过程中各处理的 pH 值均在 7.8~9.0 之间, 满足好氧堆肥对 pH 值的要求。各处理中, 在堆肥初期 pH



值的降低, 可能与堆肥局部供氧不足而厌氧发酵产生有机酸以及生成大量 CO_2 有关^[14]。对照处理在一次发酵过后, 堆肥 pH 值持续下降, 是由于随着氨气的挥发损失, 微生物活动减弱, 铵根含量降低, 氨化作用减弱, 硝化作用增强, 释放的 H^+ 逐渐增多所致; 另外, 由于堆肥过程中形成了碳酸氢盐缓冲体系, 使得堆肥后期 pH 值稳定在 8.0 左右^[13,15]。添加粉煤灰的处理中, pH 值的变化保持在 8.55~9.10 范围内波动, 可能是由于所添加的粉煤灰本身呈较强碱性, 在堆肥过程中有机质降解所产生的酸性体系, 不足以中和粉煤灰本身较强碱性所致^[16]。研究结果与 Fang 等^[16] 向污泥中添加粉煤灰进行堆肥, 杨宇等^[17] 向猪粪中添加氯化镁, Samaras 等^[18] 向污泥中添加不同比例粉煤灰和石灰进行堆肥的研究结果相似。

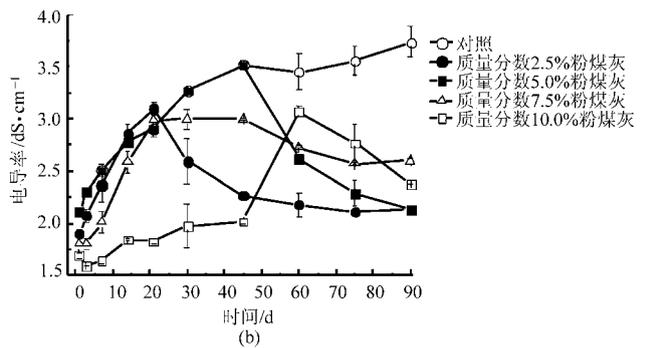


图 2 pH 值和电导率的变化曲线

Fig. 2 Change of pH value and EC during composting

由图 2b 可见, 添加粉煤灰的各处理中电导率均呈现出先增加后降低的趋势, 而对照处理电导率则持续增加最后趋于相对稳定。在堆肥过程的初期, 除添加 10.0% 粉煤灰的处理电导率相对较低外, 其他各处理的电导率相差不大, 可能是由于过多的粉煤灰将堆肥反应过程中产生的小分子络合为难溶的络合物, 降低了堆肥的电导率^[19]; 另外可能由于粉煤灰包裹了物料, 有机物料降解速率减慢使得电导率降低。这一研究结果与陈广银等^[19] 用添加质量分数 4.0% 石灰预处理的树叶进行堆肥过程中的电导率变化相一致。

2.2 碳氮比和总氮的变化

碳氮比可被用作评价堆肥腐熟度的参数, 反映堆肥的稳定程度以及堆肥中是否存在对植物有毒害作用的物质^[13]。碳氮比的变化曲线如图 3a 所示, 除了 10% 粉煤灰处理以外, 其余各处理的变化趋势相同, 都是先增加后迅速降低, 最后达到相对稳定。这一研究结果与 Zorpas 等^[14] 将污泥、锯末和沸石混合进行好氧堆肥中碳氮比变化相一致。随着粉煤灰含量的增加, 各处理碳氮比分别从堆肥初始的 24.80、25.43、27.93、30.26 和 38.04 变化至堆肥结

束时的 17.64、21.46、19.05、20.98 和 33.17, 分别下降了 28.87%、15.61%、31.79%、30.66% 和 12.80%。在堆肥前 7 d 内, 由于堆肥氮以氨气的形式大量损失, 各处理碳氮比均有所增加, 但到堆肥后期, 由于硝化作用的进行以及部分 NH_4^+ -N 被微生物转化为有机氮, 加上堆肥有机质的降解, 使堆肥碳氮比在堆肥后期迅速降低, 并保持在一个相对稳定的水平, 表明堆肥已基本腐熟。

经验表明, 堆肥过程含水率在 60%~70% 之间最适合于微生物活动, 因此本次试验未对堆肥物料的碳氮比进行调节, 只是从含水率的角度进行物料配比。但在降解植物残体的过程中, 氮被认为是影响微生物生长及活性的限制因素, 另外, 氮素的含量也是衡量堆肥利用价值的重要指标。本试验堆肥过程中总氮的变化如图 3b 所示, 各处理的变化趋势基本一致, 都是在堆肥前 7 d 迅速减小, 随后逐渐增加并保持相对稳定, 表明堆肥氮素损失主要在堆肥前 7 d, 这和堆肥过程中的实际观察相一致。到堆肥后期由于有机质的降解, 对堆肥的养分有一定的“浓缩效应”, 总氮质量分数有缓慢增加。但 10.0% 粉煤灰处理在 60 d 后, 总氮明显减少, 这与 Fang 等^[16]

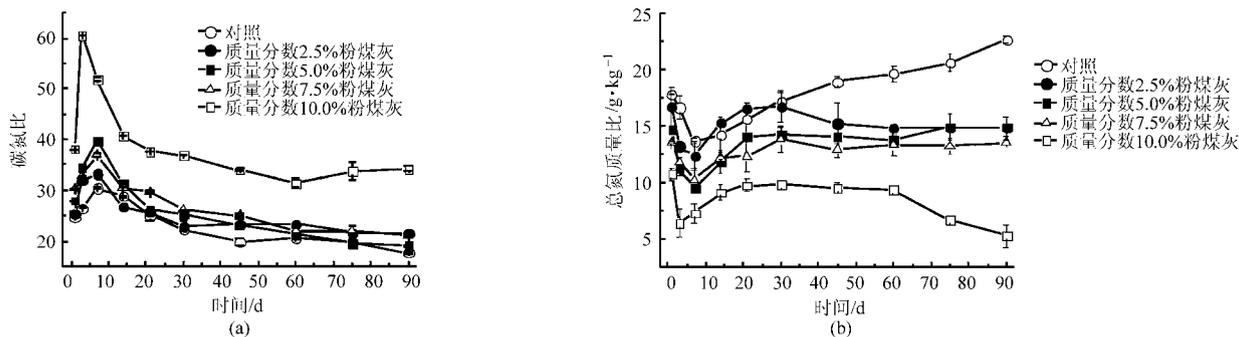


图3 碳氮比和总氮质量比的变化曲线

Fig. 3 Change of C/N ratio and TN during composting

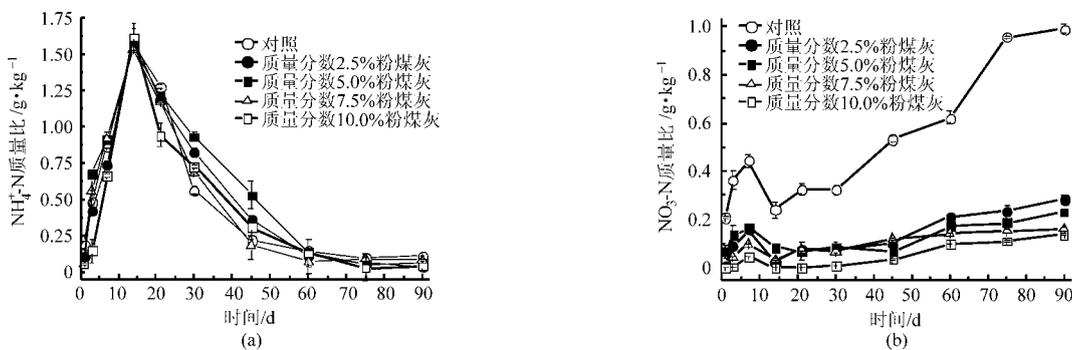
向污泥中添加 10%、25% 和 35% 的粉煤灰进行堆肥所得的结论不同,其原因有待进一步研究。

2.3 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的变化

NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的变化曲线如图 4 所示。由图 4a 可见,各处理 NH_4^+ -N 表现出相似的变化趋势,即先增加后降低。这和前人的研究结果一致^[13-16],即一次发酵期各处理 NH_4^+ -N 均迅速增加,而在堆肥后期,各处理 NH_4^+ -N 均迅速降低。Fang 等^[16]发现,当粉煤灰用量达 35% 时会加速 NH_4^+ -N 的损失,而在本研究中并未明显观察到该现象,可能是由于本试验中最高粉煤灰添加比例仅为 10% 所致。一般认为,堆肥中 NH_4^+ -N 质量比低于 0.40 g/kg 堆肥已经腐熟^[13],本试验各处理中 90 d 后堆肥中 NH_4^+ -N 均不足 0.40 g/kg,说明所有堆肥已达到腐熟堆肥的

标准。

由图 4b 可见,各处理的 NO_3^- -N 均呈现出增加的趋势。在堆肥前 7 d, NO_3^- -N 质量比有一定程度的增加,此后,随着堆肥时间的延长, NO_3^- -N 持续增加。这与陈广银等^[19]用石灰处理树叶进行堆肥的研究结果相一致。堆肥中,各处理 NO_3^- -N 分别从 0.209、0.016、0.066、0.004 和 0.003 g/kg 增加到 0.991、0.283、0.230、0.159 和 0.138 g/kg。随着粉煤灰用量的增加, NO_3^- -N 质量比的增加越小,这表明添加粉煤灰对 NO_3^- -N 的生成有抑制作用。Fang 等^[16]在研究中也发现,与对照相比,添加粉煤灰后堆肥中 NO_3^- -N 的生成会有一定的减慢。这可能是由于粉煤灰的碱性特征,抑制了硝化细菌的生长所致^[16,19]。

图4 猪粪堆肥过程中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 质量比的变化曲线Fig. 4 NH_4^+ -N and NO_3^- -N change during composting process

2.4 总磷和总钾的变化

总磷和总钾的变化曲线如图 5 所示。

随着粉煤灰比例增加,各处理的总磷质量比分别从最初的 4.46、3.58、3.12、2.75 和 2.42 g/kg 增至堆肥结束时的 9.88、9.59、8.58、7.77 和 6.16 g/kg;各处理总钾质量比分别从最初的 13.35、11.16、10.03、9.53 和 8.84 g/kg 上升到堆肥结束时的 20.07、15.54、13.95、11.48 和 11.67 g/kg,除了对照增加较明显外,其余添加粉煤灰处理中总钾增加幅度相对较小。但总体而言,总磷和总钾的变化趋势

相同,随着堆肥时间的延长,各处理都呈迅速增加的趋势,添加粉煤灰对猪粪堆肥总磷和总钾的增加影响不明显,但进行堆肥处理对猪粪中磷钾等养分有一定的“浓缩效应”^[16]。

2.5 种子发芽指数和发芽率的变化

通过对堆肥的种子发芽指数的毒性研究,不但可以检测堆肥样品中的残留植物毒性,而且也能预计毒性的发展。Zucconi 等^[20]认为,当 GI 大于 0.5,说明堆肥已腐熟并达到了可接受的程度,即基本没有毒性。本试验中 GI 的变化如图 6 所示。

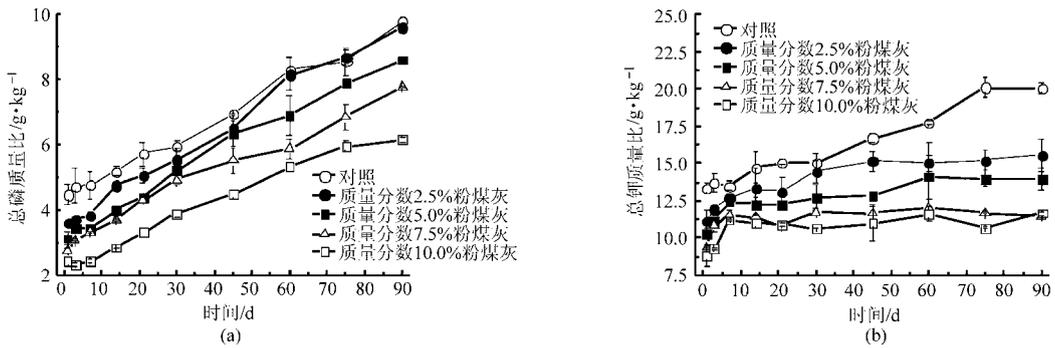


图5 总磷和总钾的变化

Fig. 5 Change of TP and TK during composting process

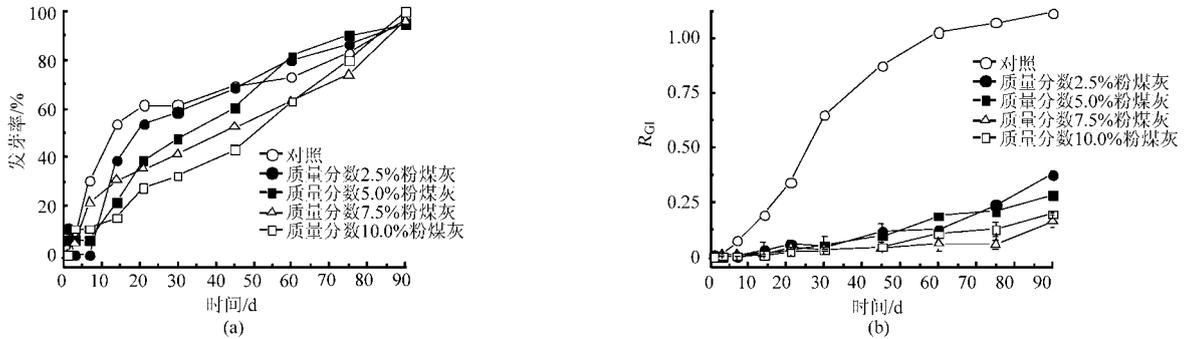


图6 雪里蕻种子发芽指数(GI)和发芽率的变化

Fig. 6 Change of potherb mustard (*Ardisiasquamulosa presl*) GI and R_{GI}

由图6可知,随着堆肥时间的延长,所有处理中,雪里蕻种子的发芽率逐渐增加,最终均超过90%;而发芽指数GI,却只有未添加粉煤灰的处理增加很迅速;其余添加粉煤灰的处理,GI增加较缓慢。发芽率和发芽指数GI的比较,可以发现,添加粉煤灰对种子发芽率的影响相对较弱,但会影响根长的增加,其作用随着粉煤灰比例的增加而增加^[19]。

Garcia等^[21]采用城市有机废物堆肥时指出,一般作物种子的发芽过程可分为初期的发芽抑制阶段、中期的迅速上升阶段和后期缓慢上升至稳定阶段。由图6a可看出,雪里蕻的种子发芽在所有处理中均呈现在前7d发芽受到抑制的现象,这与Garcia等^[21]的研究结果相印证。这可能是未腐熟堆肥中含有的挥发性脂肪酸及酚酸等对植物生长产生了抑制作用^[22-23],也可能是由于在堆肥的前7d产生了大量的 NH_3 抑制了种子的发芽所致^[16,24]。但本研究中发现,添加粉煤灰的处理中,并未明显观察到雪里蕻种子发芽的后期GI缓慢上升至稳定阶段,关于这一点,尚待进一步研究。但总体上,在90d的堆置过程中,添加粉煤灰不会影响雪里蕻种子的发芽率,但添加碱性物质(粉煤灰、石灰等)会对种子发芽产生一定的抑制作用^[11,25]。

3 结论

(1) 猪粪添加粉煤灰对堆肥的pH值影响较大,对照处理90d后pH值稳定在7.88,而添加粉煤灰的各处理中pH值保持在8.55~9.10范围内;在整个堆肥过程中,添加粉煤灰的各处理中电导率均呈现出先增加后降低的趋势,而对照处理电导率则持续增加最后趋于相对稳定。

(2) 在堆肥过程中,碳氮比随着堆肥时间的延长而降低,而总氮则逐渐升高,但当粉煤灰比例达10.0%时,在60d后堆体总氮有明显的降低;添加粉煤灰对 NH_4^+-N 的影响不大,所有处理中 NH_4^+-N 均呈现出先增加后降低的趋势,90d后堆体中 NH_4^+-N 均不足0.40g/kg。虽然在堆肥过程中,各处理的 NO_3^--N 均呈现出增加的趋势,但添加粉煤灰会抑制堆肥中 NO_3^--N 的生成,且抑制作用与粉煤灰用量呈正相关。

(3) 无论添加粉煤灰与否,随着堆肥时间的延长,各处理总磷和总钾均迅速增加,发芽率也逐渐增加,并最终均超过90%;虽然添加粉煤灰对堆肥总磷、总钾和发芽率的影响不大,但会抑制雪里蕻根部的生长。90d的堆肥试验表明,添加粉煤灰对猪粪堆肥的腐熟没有影响。

参 考 文 献

- 1 王方浩,马文奇,窦忠霞,等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学,2006,26(5):614~617.
Wang Fanghao, Ma Wenqi, Dou Zhongxia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. China Environmental Science, 2006, 26(5):614~617. (in Chinese)
- 2 柴晓利,张华,赵由才,等. 固体废物堆肥原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:16~18.
- 3 李鹏,齐光海. 饲料添加剂的使用安全研究进展[J]. 饲料工业,2006,27(18):7~10.
Li Peng, Qi Guanghai. Advances in security of using feed additive[J]. Feed Industry, 2006,27(18):7~10. (in Chinese)
- 4 李书田,刘荣乐,陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报,2009,28(1):179~184.
Li Shutian, Liu Rongle, Shan Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. Journal of Agro-environment Science, 2009,28(1):179~184. (in Chinese)
- 5 张树清,张夫道,刘秀梅,等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(6):822~829.
Zhang Shuqing, Zhang Fudao, Liu Xiumei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6):822~829. (in Chinese)
- 6 Li Y X, Li W, Wu J, et al. Contribution of additive Cu to its accumulation in pig feces; study in Beijing and Fuxin of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(5):610~615.
- 7 郑国砥,陈同斌,高定,等. 好氧高温堆肥处理对猪粪中重金属形态的影响[J]. 中国环境科学,2005,25(1):6~9.
Zheng Guodi, Chen Tongbin, Gao Ding, et al. Influence of high temperature aerobic composting treatment on the form of heavy metals in pig manure[J]. China Environmental Science, 2005, 25(1):6~9. (in Chinese)
- 8 董占荣,陈一定,林咸永,等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态[J]. 浙江农业学报,2008,20(1):35~39.
Dong Zhanrong, Chen Yiding, Lin Xianyong, et al. Investigation on the contents and fractionation of heavy metals in swine manures from intensive livestock farms in the suburb of Hangzhou[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2008, 20(1):35~39. (in Chinese)
- 9 康军,张增强,孙西宁,等. 污泥堆肥合理施用量确定方法[J]. 农业机械学报,2010,41(6):98~102.
Kang Jun, Zhang Zengqiang, Sun Xining, et al. Rational application rate of sewage sludge compost[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):98~102. (in Chinese)
- 10 刘浩荣,宋海星,荣湘民,等. 钝化剂对好氧高温堆肥处理猪粪重金属含量及形态的影响[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(3):74~80.
Liu Haorong, Song Haixing, Rong Xiangmin, et al. Effect of heavy metal passivaor on concentrations and forms of heavy metals in pig manure composted aerobically under high temperature [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(3):74~80. (in Chinese)
- 11 姜华,吴波,李国学. 添加不同钝化剂降低污泥堆肥的植物毒性研究[J]. 环境工程学报,2008,2(10):1413~1415.
Jiang Hua, Wu Bo, Li Guoxue. Study on reducing toxicity to plant from sewage sludge compost treated by different passivation reagents[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(10):1413~1415. (in Chinese)
- 12 生骏,陆文静,王洪涛. 粉煤灰对污泥堆肥过程和土地施用后交换态重金属(Cu, Zn, Pb)的影响[J]. 环境科学,2007,28(6):1367~1371.
Sheng Jun, Lu Wenjing, Wang Hongtao. Effects of flyash on the exchangeable heavy metals (Cu, Zn, Pb) during sewage sludge composting and land utilization[J]. Environmental Science, 2007,28(6):1367~1371. (in Chinese)
- 13 邵淼,杨淑英,张增强,等. 不同处理对高含水率奶牛粪好氧堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(5):982~989.
Shao Miao, Yang Shuying, Zhang Zengqiang, et al. Effect of different treatments on composting of high water content dairy manure [J]. Journal of Agro-environment Science, 2010,29(5):982~989. (in Chinese)
- 14 Zorpas Antonis A, Loizido Maria. Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of a composting product from anaerobically stabilized sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(16):7545~7552.
- 15 Brito L M, Coutinho J, Smith S R. Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(18):8955~8960.
- 16 Fang M, Wong J W C, Ma K K, et al. Co-composting of sewage sludge and coal fly ash; nutrient transformations[J]. Bioresour Technology, 1999,67(1):19~24.

- 7 饶秀勤,岑益科,应义斌. 基于外形几何特征的鸡蛋重量检测模型[J]. 中国家禽,2007,29(5):18~20.
Rao Xiuqin, Cen Yike, Ying Yibin. Study on the model of egg weight detecting based on its geometry [J]. China Poultry, 2007, 29(5):18~20. (in Chinese)
- 8 王树才,任奕林,陈红,等. 利用敲击声音信号进行禽蛋破损检测和模糊识别[J]. 农业工程学报,2004,20(4):130~133.
Wang Shucui, Ren Yilin, Chen Hong, et al. Detection of cracked-shell eggs using acoustic signal and fuzzy recognition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4):130~133. (in Chinese)
- 9 王树才,文友先,刘俭英. 基于机器人的禽蛋自动检测与分级系统集成开发[J]. 农业工程学报,2008,24(4):186~189.
Wang Shucui, Wen Youxian, Liu Jianying. Integrated development of the system of robot for detecting and grading eggs [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(4):186~189. (in Chinese)
- 10 Lin Hao, Zhao Jiewen, Chen Quansheng, et al. Eggshell crack detection based on acoustic response and support vector data description algorithm [J]. European Food Research and Technology, 2009,230(1):95~100.
- 11 Narushin V G. Theavian egg: geometrical description and calculation of parameters [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997,68(3):201~205.
- 12 Narushin V G. Egg geometry calculation using the measurements of length and breadth[J]. Poultry Science, 2005, 84(3):482~484.
- 13 郁志宏,王春光,张晓芳,等. 自适应粒子群神经网络识别种蛋成活性[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,2006,37(4):464~467.
- 14 郁志宏,王栓巧,张平,等. 应用改进遗传神经网络识别种蛋蛋形试验[J]. 农业工程学报,2009,25(10):340~344.
Yu Zhihong, Wang Shuanqiao, Zhang Ping, et al. Experiment on automatic shape identification of hatching eggs based on improved genetic algorithm neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10):340~344. (in Chinese)
- 15 郁志宏,倪志华,李海军,等. 机器视觉技术在禽蛋品质和孵化成活性检测中的应用[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2004,25(3):116~120.
Yu Zhihong, Ni Zhihua, Li Haijun, et al. Application of machine vision technique to detecting eggs quality and hatching eggs fertility [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2004,25(3):116~120. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 105 页)

- 17 杨宇,魏源送,刘俊新. 镁盐添加对猪粪堆肥过程中氮、磷养分保留的影响[J]. 环境科学,2008,29(9):2672~2677.  
Yang Yu, Wei Yuansong, Liu Junxin. Effect of magnesium salt addition on nutrients conservation during swine manure composting[J]. Environmental Science, 2008,29(9):2672~2677. (in Chinese)
- 18 Samaras P, Papadimitriou C A, Haritou I, et al. Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,154(1~3):1052~1059.
- 19 陈广银,王德汉,吴艳,等. 石灰预处理对树叶堆肥过程中养分转化的影响[J]. 生态环境,2007,16(1):77~82.  
Chen Guangyin, Wang Dehan, Wu Yan, et al. Effect of lime-pretreatment on nutrient transformation of leaves compost[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1):77~82. (in Chinese)
- 20 Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost [J]. Biocycle, 1981, 22(1):54~57.
- 21 Garcia C, Hernandez T, Costa F. Study on water extract of sewage composts[J]. Soil Science Nutrient, 1990, 37(3):399~408.
- 22 Warman P R. Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity [J]. Compost Science and Utilization, 1999, 7(3):33~37.
- 23 Kirchmann H, Widen P. Separately collected organic household wastes [J]. Swedish Journal of Agricultural Research, 1994, 24(1):3~12.
- 24 黄国锋,钟流举,张振钿,等. 猪粪堆肥化处理过程中的氮素转变及腐熟度研究[J]. 应用生态学报,2002,13(11):1459~1462.  
Huang Guofeng, Zhong Liuju, Zhang Zhentian, et al. On nitrogen transformations and maturity during composting of pig manure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(11):1459~1462. (in Chinese)
- 25 Wong J W C, Fung S O, Selvam A. Coal fly ash and lime addition enhances the rate and efficiency of decomposition of food waste during composting [J]. Bioresource Technology, 2009,100(13):3324~3331.