

堆肥反应器中硫磺对牛粪好氧堆肥的保氮效果研究

顾文杰, 张发宝*, 徐培智, 解开治, 唐拴虎

(广东省农业科学院土壤肥料研究所, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广东广州 510640)

摘要: 利用堆肥反应器严格控制堆肥条件, 以牛粪和蘑菇渣为原料进行好氧堆肥, 在堆肥过程中添加硫磺粉, 研究硫磺对堆肥温度、pH、氮素转化、硫素转化和保氮效果的影响。结果表明, 堆肥中添加 0.5% 硫磺粉 (T1) 对堆肥温度没有显著影响, 高温期 ($\geq 50^{\circ}\text{C}$) 维持 5.5 d; 而添加 1.0% 硫磺粉 (T2) 能快速升温, 但堆肥高温期维持时间 4.6 d。添加不同量的硫磺粉均能显著降低堆肥 pH, 与 CK 比较差异显著。添加硫磺粉能大幅度增加铵态氮含量, 至堆肥结束时, T1 和 T2 处理铵态氮含量分别是 CK 处理的 15 倍和 24 倍, 差异极显著; 还增加了堆肥有效硫含量, 至堆肥结束 T1 和 T2 有效硫含量分别较堆肥初始增加 35.7% 和 77.1%。整个堆肥过程总氮 (TN) 含量呈增加的趋势, 堆肥结束时 CK、T1 和 T2 处理的 TN 含量分别达 15.8、16.5 和 16.9 g/kg, T1 和 T2 分别比 CK 处理增加 4.4% 和 7.0%。说明在牛粪好氧堆肥中添加 0.5% 或 1.0% 硫磺粉, 均可起到一定的保氮作用, 可大幅度提高堆肥铵态氮和有效硫的含量, 改善了堆肥养分品质; 而且添加 1.0% 硫磺粉效果好于 0.5% 硫磺粉。但是添加 1.0% 硫磺粉缩短了堆肥高温期, 降低了种子发芽指数, 不利于堆肥的无害化进程。

关键词: 硫磺; 牛粪; 好氧堆肥; 保氮效果; 堆肥反应器

中图分类号: S141.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)01-0224-07

Nitrogen conservation by adding sulfur to dairy manure in compost bioreactors

GU Wen-jie, ZHANG Fa-bao*, XU Pei-zhi, XIE Kai-zhi, TANG Shuan-hu

(Soil and Fertilizer Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/

Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

Abstract: By utilizing compost bioreactors with dairy manure and mushroom residues as feedstocks under controlled aerobic conditions, nitrogen and sulfur transformation, compost temperature and nitrogen conservation were studied over a 21 day composting process by adding sulfur. In this experiment, sulfur was added at rates of: 0 (non-amended control, CK), 0.5% (T1, on weight basis), 1.0% (T2) with three replicates. Compared to the CK, the addition of sulfur at a rate of 0.5% (T1) has no significant effects on compost temperature, and the thermophilic period (temperatures greater than 50°C) is about 5.5 days, while, compost temperature is increased under the addition of sulfur at a rate of 1.0%, and thermophilic period is about 4.6 days. pH of compost is significantly decreased under the additions of sulfur, while ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) content is significant increased. For example, at the end of this experiment, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ contents of T1 and T2 are 15 and 24 times more than that of the CK, respectively. The extractable sulfur content is also significantly increased, and at the end of the experiment, extractable sulfur contents of T1 and T2 are increased by 35.7% and 77.1% compared to their initial values at the beginning of the composting. Slowly increased trend in total nitrogen content is observed during this comcomposting process. The total nitrogen contents are 16.5 g/kg for T1, 16.9 g/kg for T2 and 15.8 g/kg for CK, with increases by 4.4% for T1 and 7.0% for T2. These results suggest that the additions of sulfur (0.5% or 1%) to the compost can significantly increase $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and extractable sulfur contents, and enhance nitrogen conservation, thus impro-

收稿日期: 2010-03-01

接受日期: 2010-08-13

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2007BAD89B14); 广东省教育部产学研合作项目(2008A090400001)资助。

作者简介: 顾文杰(1982—), 女, 黑龙江鹤岗人, 硕士研究生, 主要从事废弃物生物处理和环境微生物方向的研究。

E-mail: guwenjie1982@yahoo.cn。

* 通讯作者 Tel: 020-38468460, E-mail: fabaozhang@163.com

ving the quality of compost. Compare with the addition of sulfur (0.5%), effect of the addition (1%) is better, however, the thermophilic period is shorter and germination index is reduced, which are disadvantages for the harmless process of composting.

Key words: sulfur; dairy manure; aerobic composting; nitrogen conservation; compost bioreactors

经验表明,有机固体废弃物的处理应以资源化利用为主导方向,主要的技术途径就是通过对有机废弃物资源进行高温堆肥处理,实现废弃物的无害化和资源化利用^[1-2]。高温堆肥过程中普遍存在氮素损失^[3-9]。Barrington 等^[5]总结了畜禽粪/秸秆、污泥/秸秆、畜禽粪/锯屑联合堆肥时,各组混合废物在堆肥过程中的氮损失量约为进料总氮的 16%~76%。高温堆肥过程中的氮素损失受堆肥物料组成、物料 C/N 比、pH 值、通风/温度、湿度和堆肥添加剂等的共同影响^[5-10]。国内外对控制或减少高温堆肥过程中的氮损失进行了大量研究,主要是改变堆肥工艺条件,如保障适量的通风、适当的湿度、控温等物理方法^[4, 10];以及堆肥过程中通过加入堆肥添加剂减少氮素损失^[11-18]。添加剂的研究较多,其中物理添加剂有泥炭、沸石、玄武石等。如 Kithome 等^[14]用沸石和椰子壳纤维覆盖在堆肥表面降低了氨气挥发;黄懿梅等^[15]研究表明,沸石和草炭可以降低堆肥氨气挥发。化学添加剂主要是氯化铁、过磷酸钙、磷酸、氢氧化镁等。如 Witter 等^[17]在鸡粪堆肥中加入氯化镁、氯化钙和硫酸镁等镁盐、钙盐等显著降低了氨气挥发;林小凤等^[11]在堆肥中添加氯化铁和过磷酸钙能提高堆肥铵态氮、硝态氮和总氮的含量,同样起到一定保氮作用;任丽梅等^[16]研究了氢氧化镁与磷酸混合物可作为堆肥化过程中的

氮素损失原位固定剂。另外,也有研究表明,在堆肥中添加微生物菌剂可减少氮素损失。Kuroda 等^[18]分别研究了在鸡粪和猪粪中添加不同微生物菌剂,结果表明可以减少氮素损失。但以上的方法均在一定程度上控制了氨气的挥发,减少了氮素损失,仍存在效果不稳定、成本过高、影响堆肥品质和生物安全性等问题。

硫磺作为一种酸性化学物质,价格相对低廉,在堆肥中添加硫磺可同时增加堆肥中硫的含量,提供植物生长过程中不可或缺的硫元素。硫磺也是一种常用农药,目前对硫磺在堆肥中的应用研究较少。本试验利用堆肥反应器,在严格控制堆肥条件的情况下,研究堆肥中加入硫磺对减少氮素损失的作用,为其在高温好氧堆肥中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥原料和装置

以鲜牛粪和蘑菇渣为原料进行好氧堆肥。牛粪取于广州南沙区珠江奶牛场,蘑菇渣来源于广东东莞市星河生物科技有限公司食用菌厂。硫磺为过 0.15 mm 筛的工业硫磺粉。堆肥原料的理化性质见表 1。

表 1 堆肥原料的理化性质

Table 1 Physico-Chemical properties of aerobic composting

原料 Raw material	含水率(%) Moisture	C/N	有机质(g/kg) OM	全氮(g/kg) Total N	全磷(g/kg) Total P	全钾(g/kg) Total K
牛粪 Dairy manure	75.0	21.07	501.3	13.8	15.4	17.0
蘑菇渣 Mushroom residue	8.9	29.57	805.4	15.8	19.1	11.7

堆肥装置:采用有效容积 100 L 的堆肥反应器(VTD-100)进行好氧堆肥(图 1)^[19]。反应器所采用材料为不锈钢,外壁设计有保温层,其厚度为 50 mm。反应器内配有搅拌和排风装置,其中轴线上设有温度、水分和氧气探头,将每个探头连接到高精度远传

数据采集系统上,并和计算机连接,对堆肥过程中的温度、水分和氧气进行在线监测;同时自动控制搅拌、通气和供氧。供氧方式为强制通风伴随翻堆搅拌,通风量为 30 L/min,通风频率为每间隔 1 h 通风 6 min;每 48 h 搅拌一次,搅拌转速为 6.4 r/min。

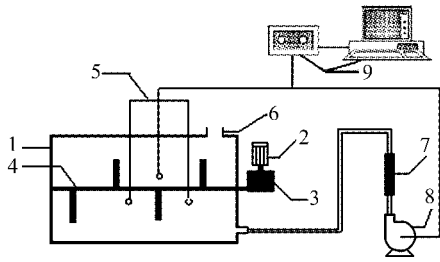


图1 堆肥反应器示意图

Fig.1 Schematic map of the experimental bioreactor

[注(Note): 1—发酵仓 Fermenting vessel; 2—电机 Motor; 3—减速机 Reducer; 4—搅拌桨 Stirring paddle; 5—探头 Probes; 6—排气孔 Air vent; 7—流量计 Flow meter; 8—风机 Blower; 9—计算机系统 Computer system.]

1.2 试验设计

根据堆肥原料的性质,将牛粪和蘑菇渣按照3:2的比例进行混合,C/N为25~30:1,调整含水率50%。试验堆制时间为2009年3月17日—4月7日,共计21 d。试验地点为广东省农业科学院土壤肥料研究所堆肥工程实验室。

试验设3个处理:1)不加硫磺仅原料堆肥(CK);2)原料+125 g 硫磺(T1);3)原料+250 g 硫磺(T2)。T1和T2硫磺添加量分别为堆肥原料(干基)的0.5%和1.0%(W:W)。硫磺在堆料搅拌过程中均匀地撒到原料中。每个处理设置3个重复。在堆肥过程的第0、1、2、3、5、7、10、14和21 d进行采样,共计9次。采样方式为5点采样法,即中心及四角部位采集样品共约500 g。采样点为反应器中堆体表面以下20~30 cm处,然后进行充分混合,用于分析。将采集的新鲜样品用于pH、铵态氮、硝态氮和种子发芽指数(GI)的测定;部分放于室内风干后粉碎,过1 mm筛贮存,用于全氮、全硫和有效硫的测定,剩余样品于4℃冰箱保存。

1.3 测定项目与方法

堆肥温度由PT-100铂电极在线记录。

pH测定^[20]:堆肥水浸提液按鲜样:水为1:10(W:V)的比例混合,室温振荡30 min,静止30 min后用上清液测定pH(PB-10 Sartorius)。

堆肥中铵态氮和硝态氮的测定:按鲜样:1 mol/L KCl为1:10(W:V)的比例浸提,室温振荡30 min,离心过滤后,上清液用流动注射分析仪(AMS FRANCE FUTURA)测定^[21]。

风干样经H₂SO₄-H₂O₂消煮后用凯氏定氮法测定全氮^[20];全硫采用硝酸镁氧化—硫酸钡比浊

法^[21]测定;有效硫采用磷酸盐—乙酸浸提—硫酸钡比浊法^[21]测定。

种子发芽指数(GI)的测定:取5 g鲜样加入50 mL蒸馏水,振荡1 h,吸取5 mL滤液,加到铺有2张滤纸的9 cm培养皿中,每个培养皿播20粒萝卜种子,30℃下暗培养48 h,测定发芽率和根长,计算种子发芽指数(GI)值^[3]。其计算公式为:

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

试验数据用EXCEL2003和SPSS16.0进行分析。

2 结果与分析

2.1 堆肥温度的变化

好氧堆肥的实质是微生物分解大分子有机固体废弃物产生能量的过程。其所产生的能量部分被微生物繁殖所利用,部分以热量的形式散发出来,使堆肥温度升高。因此,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。图2看出,各处理升温迅速,温度较高。T1和T2处理在高温期(≥50℃)过后温度逐渐降低,CK处理在堆肥温度下降至40℃左右后又经历了一次升温过程,但二次升温持续时间短,温度较低,未达到高温(≥50℃)。表2可知,各处理到达高温期所用时间以T2处理最短,其次是T1处理,最慢为CK处理。然而高温维持时间和≥55℃的维持时间均为CK最长,其次是T1处理,最后是T2处理。CK、T1和T2处理最高温度差异较小,均在67℃左右。CK和T1处理高温维持期均>5 d,符合我国粪便无害化卫生标准GB 7959-87的规定,堆肥的高温期温度达50~55℃持续5~7 d;而T2处理高温期维持4.6 d左右。

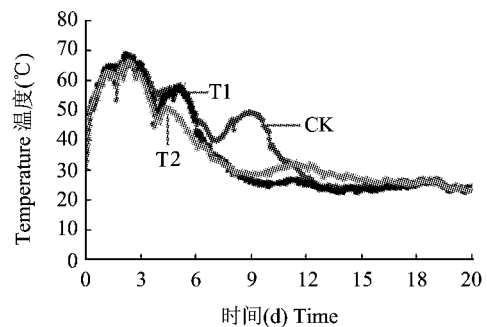


图2 不同添加量的硫磺对堆肥温度的影响
Fig.2 Temperature changes in the composting with different amounts of sulfur

表 2 不同处理高温期温度变化特征

Table 2 Variations of temperature in different phases of composting

处理 Treatment	高温期 Altithermal period(≥ 50 $^{\circ}\text{C}$)				
	到达时间(h) Arrival time	持续时间 (h) Sustainable time	到达 55 $^{\circ}\text{C}$ 时间(h) Arrival time of 55 $^{\circ}\text{C}$	$\geq 55^{\circ}\text{C}$ 持续时间(h) $\geq 55^{\circ}\text{C}$ sustainable time	最高温度($^{\circ}\text{C}$) Maximum temperature
CK	9.0	132.0	15	112.0	66.7
T1	6.0	126.0	15	89.0	67.8
T2	5.0	110.0	12	72.0	66.1

2.2 堆肥 pH 的变化

pH 是影响微生物生长繁殖的重要因素之一。相关研究表明,多数堆肥微生物适合在中性或偏碱性环境中繁殖与活动。堆肥 pH 值的变化主要是由堆体中微生物活动及其相关代谢物的变化引起的^[3,6]。图 3 表明,CK 处理 pH 变化呈现先升后将然后趋于平稳; T1 和 T2 处理 pH 呈现降-升-降,再趋于平稳的趋势。CK、T1 和 T2 处理最高 pH 分别为 8.92、8.21 和 8.12。T1 和 T2 处理由于加入硫磺

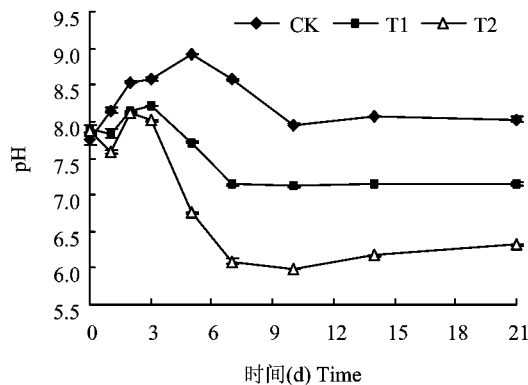


图 3 不同添加量的硫磺对堆肥 pH 的影响

Fig.3 pH changes in the composting with different amounts of sulfur

粉,有效降低了堆肥的 pH。整个堆肥过程 T1 和 T2 处理 pH 均明显低于 CK 处理,差异显著;同时 T2 处理 pH 显著低于 T1 处理。至堆肥结束时 CK、T1 和 T2 处理 pH 分别为 8.03、7.14 和 6.31。

2.3 堆肥全硫和有效硫含量变化

硫是构成生命物质所必需的元素,是蛋白质重要的组成部分,在生物体内一般氮与硫的比例约为 10:1。固体有机废弃物中通常也含有较多的硫,然而有关废弃物堆肥中硫元素转化和调控的资料仍较少。本堆肥试验中,CK、T1 和 T2 处理全硫初始含量分别为 3.7、8.6 和 12.2 g/kg,至堆肥结束时分别为 4.5、10.5 和 14.4 g/kg,可见各处理全硫含量变化不大,因有机物发酵分解的结果而均略有增加。表 3 看出,无硫磺添加的 CK 处理,有效硫含量在堆肥前后基本一致; T1 和 T2 处理有效硫含量在堆肥的第 2~5 d 开始大幅上升,至堆肥结束时有效硫含量分别较堆肥初始时增加 137.0% 和 175.7%。说明在堆肥中添加硫磺,堆肥中的微生物可以把部分硫磺氧化成硫酸根,促使有效硫含量的增加。堆肥成品中不仅含有较多的硫含量,而且含有较多的植物可直接吸收的硫酸根,可在一定程度上提高堆肥的养分含量。

表 3 不同添加量的硫磺对堆肥全硫和有效硫的影响

Table 3 Contents of available S and total S in thecomposting with different amounts of sulfur

项目 Items	处理 Treatment	时间 (d) Time									
		0	1	2	3	5	7	10	14	21	
有效硫 Available S (g/kg)	CK	2.2 ± 0.16	2.1 ± 0.12	2.0 ± 0.07	1.9 ± 0.04	2.1 ± 0.01	2.4 ± 0.09	2.5 ± 0.08	2.6 ± 0.12	2.7 ± 0.06	
	T1	2.7 ± 0.03	2.7 ± 0.00	3.2 ± 0.09	4.2 ± 0.05	6.6 ± 0.09	6.9 ± 0.11	6.5 ± 0.10	6.7 ± 0.13	6.4 ± 0.09	
	T2	3.7 ± 0.06	4.0 ± 0.07	4.2 ± 0.03	6.4 ± 0.71	9.7 ± 0.05	10.3 ± 0.07	9.4 ± 0.09	10.4 ± 0.14	10.2 ± 0.09	
全硫 Total S (g/kg)	CK	3.7 ± 0.19	4.0 ± 0.01	3.9 ± 0.42	4.0 ± 0.07	4.8 ± 0.22	4.3 ± 0.49	4.4 ± 0.31	4.1 ± 0.08	4.5 ± 0.02	
	T1	8.6 ± 0.22	9.0 ± 0.13	9.2 ± 0.24	9.6 ± 0.43	9.4 ± 0.24	9.4 ± 0.22	9.3 ± 0.04	9.8 ± 0.23	10.5 ± 0.01	
	T2	12.2 ± 0.50	13.2 ± 0.03	15.2 ± 0.69	13.5 ± 0.50	13.2 ± 0.60	13.5 ± 0.17	13.9 ± 0.27	14.5 ± 0.11	14.4 ± 0.30	

2.4 堆肥铵态氮和硝态氮含量的变化

堆肥原料中氮以有机形态为主,通常主要以蛋白质和肽的形式存在。堆肥过程中氮的转化是在微生物及其酶的作用下进行的。微生物分解含氮的有机源使之转化为简单的化合物,一些氮被转化为氨(NH_3)。堆肥中铵态氮和硝态氮含量的变化与微生物活动、温度和 pH 等因素有关,主要取决于高温、pH、氨化细菌和硝化细菌的活性^[3,6]。堆肥的铵态氮和硝态氮变化情况见图 4,CK 处理的铵态氮含量呈先升高再降低的变化趋势;T1 和 T2 处理的铵态氮含量呈现出逐渐增加,到后期也无明显的降低,稳定在一个较高的水平。堆肥 21 d 结束时,CK、T1 和 T2 处理铵态氮含量分别为 135.6、2110.1 和 3308.7

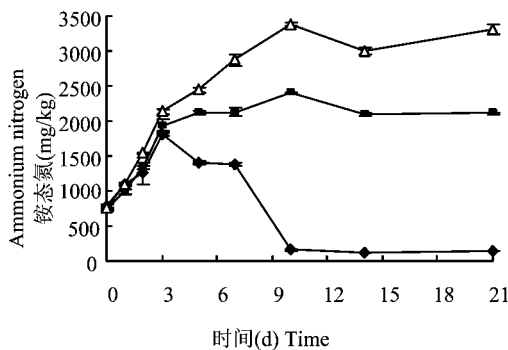


图 4 不同添加量的硫磺对堆肥铵态氮和硝态氮含量的影响

Fig. 4 Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents in the composting with different amounts of sulfur

2.5 堆肥全氮 (TN) 含量的变化

各处理的全氮含量变化趋势基本相同,呈现出先降低、后升高的趋势(图 5)。添加硫磺的 T1 和 T2 处理在堆肥第 1 d 有小幅下降;而 CK 处理在堆肥 0~3 d 均呈下降趋势,且下降幅度较 T1 和 T2 处理大。T1 处理 TN 含量在堆肥 2~10 d 迅速升高,第 10 d 至堆肥结束 TN 含量基本保持不变。T2 处理的 TN 含量第 2 d 后至堆肥结束呈现上升趋势。CK 处理在第 3 d 后 TN 含量也逐渐增加,第 15 d 后至结束含量变化不大。堆肥结束时,CK、T1 和 T2 处理的全氮含量分别为 15.84、16.52 和 16.87 g/kg; T1 和 T2 处理的全氮含量分别比 CK 处理高 4.4% 和 7.0%,说明加入硫磺粉可以起到一定的保氮作用。

2.6 添加硫磺对发芽指数 (GI) 的影响

未腐熟的堆肥含有植物毒性物质,对植物的生长产生抑制作用,堆肥产品的种子发芽指数是评价堆肥腐熟度的最重要的指标之一。通常认为种子发芽指数 GI 大于 50% 时就可以判断堆肥基本无毒性^[22];当种子发芽指数 GI 大于 80%~85% 时,就

可以判断堆肥对植物没有毒性,完全达到腐熟^[23]。本试验在堆制后第 7、14 和 21 d 测定了堆肥浸提液的萝卜种子发芽指数 (GI)。图 6 看出,在堆肥第 7 d 时,T2 处理的 GI 可达到 50% 以上,CK 和 T1 处理均可达到 80% 以上,CK 处理略高于 T1 处理。随着堆肥的进行,在堆肥第 10 d,T2 处理 GI 可达到 80%

mg/kg,3 个处理铵态氮含量差异极显著 ($p < 0.01$); T1 和 T2 处理铵态氮含量分别是 CK 处理的 15 倍和 24 倍。说明 T1 和 T2 处理由于加入了硫磺,有效降低了堆肥的 pH,减少了氨挥发;同时在微生物的作用下单质硫转化为 SO_4^{2-} ,铵态氮结合成较稳定的硫酸铵的形式保留下来,使得硫磺的加入大幅度增加了堆肥中铵态氮的含量。

硝态氮变化波动较大,但 3 个处理总体上都是先下降再上升的趋势。在堆肥开始阶段硝态氮含量较高,进入高温阶段硝化细菌不活跃,硝态氮含量始终不高。随着温度的降低,硝态氮含量缓慢增加,3 个处理之间差异不显著。

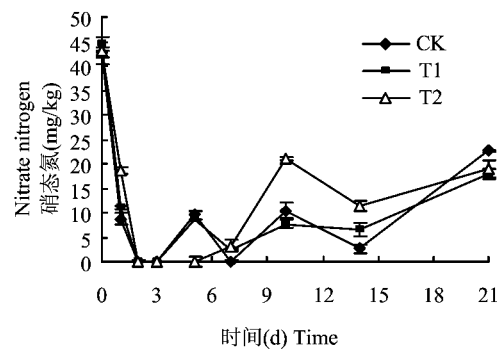


图 5 不同添加量的硫磺对堆肥全氮含量的影响

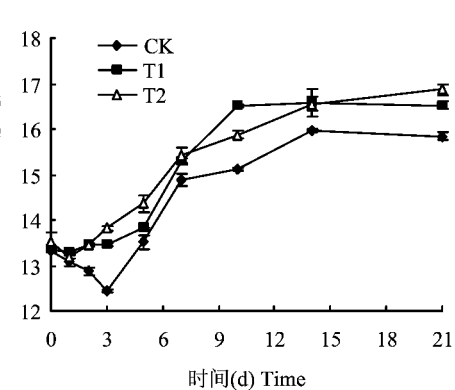


图 5 不同添加量的硫磺对堆肥全氮含量的影响

Fig. 5 Total N in the composting with different amounts of sulfur

可以判断堆肥对植物没有毒性,完全达到腐熟^[23]。本试验在堆制后第 7、14 和 21 d 测定了堆肥浸提液的萝卜种子发芽指数 (GI)。图 6 看出,在堆肥第 7 d 时,T2 处理的 GI 可达到 50% 以上,CK 和 T1 处理均可达到 80% 以上,CK 处理略高于 T1 处理。随着堆肥的进行,在堆肥第 10 d,T2 处理 GI 可达到 80%

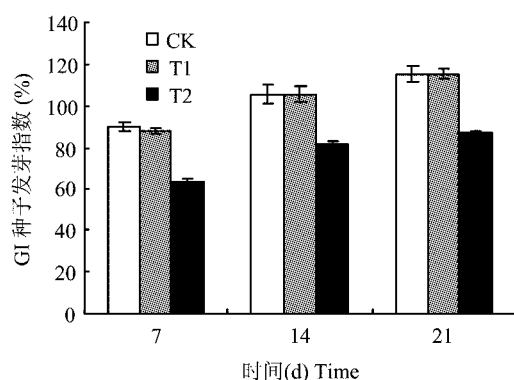


图 6 不同添加量的硫磺对种子发芽指数的影响

Fig. 6 Germination index (GI) in the composting with different amounts of sulfur

以上,CK 和 T1 处理均超过 100%,CK 处理和 T1 处理基本无差别。至堆肥结束 CK、T1 和 T2 处理种子发芽指数为 115.2%、115.3% 和 87.1%。说明在堆肥中加入堆肥原料的 0.5%~1.0% 的硫磺 (W:W),不会使堆肥产品产生植物毒性,堆肥已基本腐熟。

3 讨论

在高温堆肥过程微生物分解含氮的有机物,使之转化为简单的化合物来为新细胞物质获取氮素,一些氮被转化为氨。在堆肥原料中有两种氨的存在形态:气态氨 (NH_3) 和溶解在堆肥中的铵离子 (NH_4^+),这两种形态都会出现并能从一种形态转化为另一种,转化比例由堆体条件所决定^[3,18,24]。一般认为,高的 pH 和堆肥温度增加了氨的损失,特别是像畜禽粪便等含氮量高的原材料^[25]。

硫磺是一种常用的农药和肥料,硫磺与土壤混合后就被土壤微生物氧化为硫酸盐,因此硫磺常用于缺硫土壤和碱性土壤改良。本试验表明,在堆肥中添加 0.5% 硫磺 (T1) 和 1.0% 硫磺 (T2),以牛粪和蘑菇渣为原料进行的高温堆肥可正常进行,各处理均可达到高温,并且最高温度大致相同;但是会缩短高温期的维持时间,尤其是添加 1.0% 硫磺 (T2) 处理的高温期明显短于 CK 处理,未达到我国粪便无害化卫生标准 GB7959-87 的规定,可能影响堆肥的无害化程度。这可能是由于硫磺具有一定的杀菌作用所致,因此在今后的研究中应进一步研究硫磺的添加量以及其对堆肥中微生物的影响,以确定最佳添加量。由于硫磺为酸性化学物质,所以堆肥中添加硫磺可显著降低堆肥的 pH。黄懿梅等^[15]的试验中,添加草炭和过磷酸钙最多可以降低 0.44

个 pH 单位。本试验中添加 0.5% 硫磺 (T1) 处理 pH 最小下降 0.71 个 pH 单位,最多可降低 0.89 个 pH 单位;添加 1.0% 硫磺 (T2) 处理最小下降 0.8 个 pH 单位,最多可降低 1.72 个 pH 单位。由此可见,添加硫磺对 pH 的降低效果更明显。硫磺粉的添加还可以大幅度增加堆肥中铵态氮含量,这是由于堆肥中的微生物可以把部分硫磺氧化成 SO_4^{2-} ,增加堆肥中有效硫含量的同时可与 NH_4^+ 结合成较稳定的硫酸铵的形式保留下来,提高了堆肥养分。而且硫磺添加量越多,铵态氮含量越高,这与林小凤等^[11]的随着氢氧化镁和磷酸添加量的增加,氮的固定效果增强研究结果一致。堆肥结束时,T1 和 T2 处理的 TN 含量分别比 CK 处理高 4.4% 和 7.0%,说明加入硫磺粉可以起到一定的保氮作用,与相关堆肥保氮研究^[11-16]结果一致。从本试验种子发芽指数结果还可看出,0.5% 或 1.0% 硫磺粉的加入不会使堆肥产品产生植物毒害作用,但是添加 0.5% 硫磺 (T1) 处理腐熟效果更好。

从本试验结果看,在保氮效果上是添加 1.0% 硫磺粉更佳,而从无害化角度看,添加 0.5% 硫磺粉较适宜。因此,在工业生产中应用时要谨慎选择硫磺粉的添加量,以求即可达到最佳的保氮效果,又可达到无害化标准。

参考文献:

- [1] 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报,2005,21(8): 169-173.
Su Y M, Li G X, Zhang D F *et al.* Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China [J]. Trans. CSAE, 2005, 21(8): 169-173.
- [2] 黄鸿翔,李书田,李向林,等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料,2006,(1): 3-8.
Huang H X, Li S T, Li X L *et al.* Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China [J]. Soils Fert., 2006, (1): 3-8.
- [3] 李季,彭生平. 堆肥工程使用手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2005.
Li J, Peng S P. Composting project manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [4] 杨延梅,刘鸿亮,杨志峰,等. 控制堆肥过程中氮素损失的途径和方法综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(2): 213-216.
Yang Y M, Liu H L, Yang Z F *et al.* Methods and techniques in the control of nitrogen loss during the composting: A review [J]. J. Beijing Norm. Univ. (Nat. Sci.), 2005, 41(2): 213-216.
- [5] Barrington S, Choinière D, Trigui M *et al.* Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses [J]. Bioresour. Tech.,

- 2002, 83(3): 189.
- [6] Diaz L F, De Bertoldi M, Bidlingmaier W *et al.* Compost science and technology[M]. The Netherlands; Elsevier Ltd. 2007. 25 – 48.
- [7] Raviv M, Medina S, Karasnovsky A *et al.* Conserving nitrogen during composting[J]. *BioCycle*, 2002, 43(9): 48-54.
- [8] Martins O. Less of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresour. Tech.*, 1992, 42: 103–111.
- [9] Mahimairaja S, Bolan N S, Hedley M J *et al.* Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: An inoculation experiment [J]. *Bioresour. Tech.*, 1994, 47: 265–273.
- [10] 李国学,李玉春,李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(2): 252–256.
Li G X, Li Y C, Li Y F. Advance on composting of solid waste and utilization of additives [J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2003, 22(2): 252–256.
- [11] 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 X F, Li G X, Ren L M *et al.* Effect of FeCl_3 and $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ as amendments on reducing nitrogen loss during composting[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2008, 27(4): 1662–1666.
- [12] Bishop P L, Godifrey C. Nitrogen transformations during sludge composting[J]. *BioCycle*, 1983, 24(4): 34-39.
- [13] Paré T, Diné H, Schnitzer M *et al.* Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper[J]. *Biol. Fert. Soils*, 1998, 26(3): 173–178.
- [14] Kithome M, Paul J W, Boko A. Reducing nitrogen losses during simulated composting of poultry manure using absorbents or chemical amendments[J]. *J. Environ. Qual.*, 1999, 28: 194–201.
- [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 Y M, Qu D, Li G X. Effect of adding amendments on preserving nitrogen during chicken manure and saw composting [J]. *Environ. Sci.*, 2003, 24(2): 156–160.
- [16] 任丽梅,贺琪,李国学,等. 氢氧化镁和磷酸混合添加剂在模拟堆肥中的保氮效果研究及其经济效益分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 225–228.
Ren L M, He Qi, Li G X *et al.* Effect of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 amendments on nitrogen conservation during simulated aerobic composting and its benefit analyses[J]. *Trans. CSAE*, 2008, 24(4): 225–228.
- [17] Witter E, Kirchmann H. Effects of addition of calcium and magnesium salts on ammonia volatilization during manure decomposition[J]. *Plant Soil*, 1989, 115: 53-58.
- [18] Kuroda K, Hanajima D, Fukumoto Y *et al.* Isolation of thermophilic ammonium tolerant bacterium and its application to reduce ammonia emission during composting of animal wastes[J]. *Biosci. Biotech., Biochem.*, 2004, 68(2): 286–290.
- [19] 徐智,张陇利,张发宝,等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(7): 555–560.
Xu Z, Zhang L L, Zhang F B *et al.* Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor[J]. *China Environ. Sci.*, 2009, 29(7): 555–560.
- [20] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准(NY525–2002)有机肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
The People's Republic of China Ministry of Agriculture. The People's Republic of China agriculture industry standard NY 525–2002 Organic fertilizers [S]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Agrochemistry analysis methods [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] Zucconi F, de Bertoldi M. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste [A]. De Bertoldi M *et al.*(ed.). *Compost: production, quality and use* [M]. Essex: Elsevier Application Science, 1987. 30–50.
- [23] Riffaldi R, Levi-Minzi, Pera A *et al.* Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses [J]. *Waste Manag. Res.*, 1996, 4: 387–396.
- [24] 李国学,张福锁. 固体废弃物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
Li G X, Zhang F S. Composting of solid waste and production of organic compound fertilizer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 5–14.
- [25] 鲍艳宇,周启星,颜丽,等. 畜禽粪便堆肥过程中各种氮化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 374–380.
Bao Y Y, Zhou Q X, Yan L *et al.* Dynamic in changes of nitrogen form in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2008, 19(2): 374–380.