

吴飞龙, 叶美锋, 吴晓梅, 等. 添加菌糠对猪粪渣堆肥过程及氨排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 598–604.

WU Fei-long, YE Mei-feng, WU Xiao-mei, et al. Effects of mushroom bran addition on the process and NH_3 emissions of swine feces residue composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 598–604.

添加菌糠对猪粪渣堆肥过程及氨排放的影响

吴飞龙¹, 叶美锋¹, 吴晓梅¹, 林代炎^{1*}, 翁伯琦²

(1.福建省农业科学院农业工程技术研究所, 福州 350003; 2.福建省农业科学院, 福州 350003)

摘要:以规模化养猪场固液分离后的猪粪渣为试验对象,以菌糠为调理剂,设置猪粪渣和菌糠 1:0.2、1:0.3、1:0.4、1:0.5 共 4 个不同质量比例(湿基)堆肥处理,以纯猪粪渣单独堆肥为对照处理,研究了菌糠作为猪粪渣堆肥调理剂对堆肥过程和 NH_3 排放的影响。结果表明:添加菌糠有利于各堆肥处理缩短进入高温期的时间,且有利于各处理堆肥的脱水;随着菌糠添加比例的增加,各处理的干物质降解率和有机碳损失率均降低;堆肥后,对照和处理组的全氮、全磷和全钾含量均比堆肥前有所增加,而其中全磷、全钾含量的增加量随着菌糠添加量的持续增加而相应减少;当菌糠的添加比例大于 0.3 时,有利于减少猪粪渣堆肥过程中 NH_3 的排放;堆肥 36 d 后,对照及各处理堆肥均达到腐熟,且总养分和有机质均符合《有机肥料》(NY 525—2012)标准。

关键词:猪粪渣;菌糠;堆肥;调理剂; NH_3 排放

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)03-0598-07 doi:10.11654/jaes.2016-1261

Effects of mushroom bran addition on the process and NH_3 emissions of swine feces residue composting

WU Fei-long¹, YE Mei-feng¹, WU Xiao-mei¹, LIN Dai-yan^{1*}, WENG Bo-qi²

(1. Institute of Agricultural Engineering, Fujian Academy of Agriculture Sciences, Fuzhou 350003, China; 2. Fujian Academy of Agriculture Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Using the solid-liquid separated swine feces residue from large-scale pig farm as the test object, the effects of mushroom bran as bulking agent on the process and NH_3 emissions of composting were studied. In this study, four different mass ratios (wet basis) of swine feces residue and mushroom bran, 1:0.2, 1:0.3, 1:0.4, 1:0.5, were set as test groups with a control group of pure swine feces residue. The results showed that: The addition of mushroom bran shortened the time needed for the swine feces residue composting to reach a high temperature, which is conducive to compost dehydration; With the increase of mushroom bran proportion, the dry matter degradation rate and the organic carbon loss rate decreased in all test groups. After composting, the total nitrogen, phosphorus and potassium contents increased in all control and test groups, while the increment of total phosphorus and potassium content reduced with the increase amount of mushroom bran proportion; The NH_3 emissions during swine feces residue composting reduced while proportion of mushroom bran was greater than 0.3; After 36 d of composting, all the control and test groups were thoroughly decomposed, and the total nutrients of composting products were in line with the standard of <organic fertilizer>, NY 525—2012.

Keywords: swine feces residue; mushroom bran; compost; bulking agent; NH_3 emissions

收稿日期: 2016-09-30

作者简介: 吴飞龙(1982—),男,福建闽侯人,硕士,助理研究员,主要研究方向为农业环境保护。E-mail: wufl82@163.com

* 通信作者: 林代炎 E-mail: lindaiyan@126.com

基金项目: 十二五国家科技支撑项目(2012BAD14B15);福建省省属公益类科研院所专项(2014R1015-8);福建省科技重大专项(2013YZ01030004)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2012BAD14B15); The Special Fund for Provincial Public Research Institute of Fujian Province, China(2014R1015-8); The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Fujian Province, China(2013YZ01030004)

规模化猪场的发展对于提高养猪业的机械化和现代化具有重要的作用,但是规模化程度的不断扩大,也带来了猪场粪便污染物的集中排放,给生态环境造成巨大压力。固液分离机目前广泛应用于规模化养猪场粪污前处理,能够实现粪污水的减量化。猪粪渣是猪场粪污水经固液分离后的固体物质,其主要成分有猪饲料中未分解的玉米皮、猪毛、粗纤维等物质,具有有机质含量高、容重低、疏松度高的特点,且经水洗后其盐分含量较低、养分适中、重金属含量低。猪粪渣经过好氧堆肥发酵后可作为一种很好的有机肥料,但其理化性状与猪粪有明显的区别。目前,对于猪粪堆肥的研究比较多,而猪粪渣堆肥的研究还比较鲜见。

添加调理剂可提高好氧堆肥效果,但是不同的调理剂对好氧堆肥过程堆体的温度、水分、碳素、氮素的含量以及恶臭气体的排放等因素都有一定的影响^[1-3]。因此,选择合适的调理剂对于猪粪渣的好氧堆肥处理有重要的意义。菌糠是指食用菌栽培采收后废弃的固体培养基质^[4],而食用菌的培养基一般含秸秆、棉籽壳、木屑、玉米芯等原料。中国食用菌产业每年产生的废弃菌糠总量达 900 万 t^[5],而目前大部分食用菌厂处置菌糠的方法主要为直接丢弃或就地焚烧^[6]。这不仅导致腐烂恶臭或空气污染,而且造成资源浪费。菌糠中不仅残留有大量的营养物质,还具有良好的物理性状如透气透水性好、粒径均匀等,可作为堆肥的良好调理剂^[7]。目前,虽然有一些针对菌糠作为堆肥调理剂的研究,但将其作为猪粪渣堆肥的调理剂的研究还未见报道。

本研究以规模化养猪场固液分离后的猪粪渣为试验对象,研究了菌糠作为猪粪渣堆肥调理剂对堆肥腐熟度和 NH₃ 排放的影响,旨在为提升猪粪渣堆肥配方、工艺技术、氨气减排等提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用来自福清市某大型生态养猪场的粪污水经固液分离机分离后的粪渣,其主要理化性状为:含水率 74.1%,有机碳 359 g·kg⁻¹,全氮 17.4 g·kg⁻¹,全磷 16.6 g·kg⁻¹,全钾 5.80 g·kg⁻¹,C/N 20.7。菌糠是经栽培过海鲜菇的废弃菌棒,来自罗源县某海鲜菇厂,其主要理化性状为:含水率 50.9%,有机碳 386 g·kg⁻¹,全氮 22.7 g·kg⁻¹,全磷 9.68 g·kg⁻¹,全钾 14.1 g·kg⁻¹,C/N 17.0。

1.2 试验方法

试验设置对照(不添加菌糠)和 4 个添加不同比例菌糠处理,各处理配方见表 1。

表 1 试验处理配方

Table 1 Formula of trial processing

处理	猪粪渣/kg	菌糠/kg	比例	C/N
CK	300	0	1:0	20.7
T1	300	60	1:0.2	20.1
T2	300	90	1:0.3	19.8
T3	300	120	1:0.4	19.6
T4	300	150	1:0.5	19.5

注:比例是以湿重计。

试验采用条垛式好氧堆肥。人工将猪粪、菌糠按表 1 中的比例称重后混合均匀,使混合物料含水率调节至 70%~75%。将搅拌均匀的物料堆成条垛放在事先准备好的场地,堆体横截面呈梯形,下底面长和宽分别为 220 cm 和 150 cm,上底面长和宽分别为 150 cm 和 80 cm,堆体高 50 cm。试验从 2015 年 10 月 10 日开始至 2015 年 11 月 14 日,共 36 d,期间每周翻堆一次。

堆肥期内,每周取样一次,每次取样 300 g。样品一式三份,一份储存在 4 °C 冰箱中待测 pH、电导率(EC)、发芽率指数(GI);一份用烘箱在 105 °C 条件下烘干,测定含水率;另一份自然风干,粉碎后作为干样,待测总氮、总磷(P₂O₅)、总钾(K₂O)和总有机碳(TOC)。

1.3 测定指标与方法

(1)温度:用温度计对堆体多个位置的温度进行测定,取平均值。温度每天上午 9:00 测量一次,随机取 6 个堆体部位分别测定距离表层 10、25 cm 和 40 cm 位置的温度(取平均值)。

(2)氨气(NH₃):使用便携式检测仪通过静态箱法测定。测定时,用一透明塑料箱(30 cm×30 cm×30 cm,长×宽×高)盖于堆肥表面,四周覆盖严实。取样时间为 30 min,每隔 10 min 取样测定。每天上午 9:00 开始测定,所测值用于计算当天的 NH₃ 排放量,总排放为每日排放量相加,未测定天数的值取相邻天数的平均值。

(3)水分:105 °C 烘干法测定。

(4)有机质:重铬酸钾容量法。

(5)总氮、总磷和总钾含量:样品用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,总氮用开氏定氮法,总磷用钒钼酸铵比色法,总钾用火焰光度法测定。

(6)pH值:直接用pH计测定(水样比10:1)。

(7)EC值:直接用EC计测定(水样比10:1)。

(8)种子发芽指数(GI):新鲜样品与水按照1:10(W/V)比例混合振荡2h,上清液经滤纸过滤后待用。把一张大小合适的滤纸放入干净无菌的9cm培养皿中,滤纸上整齐摆放10粒小白菜种子。准确吸取5mL滤液于培养皿中,在25℃黑暗条件下的培养箱中培养48h,测定种子的发芽率和根长,同时用去离子水作空白对照。

$GI = \frac{\text{浸提液发芽数} \times \text{根长}}{\text{对照液发芽数} \times \text{根长}} \times 100\%$ 。

1.4 数据统计方法

运用SAS v8.1软件进行数据统计分析。

2 试验结果与分析

2.1 温度的变化

温度是评价堆肥稳定度最简便的物理指标,也是评价堆肥达到无害化的重要指标^[8],当其趋于环境温度时,表明堆肥已稳定。根据《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—1987)规定,堆肥温度在50~55℃以上并维持5~7d,就能够达到粪便无害化卫生标准。从图1可以看出,对照温度在堆肥开始后第4d才达到50℃以上,而各处理温度均在堆肥开始后第2d即达到50℃以上,说明添加菌糠可以缩短猪粪渣堆肥进入高温期的时间。这与薛智勇等^[9]的研究结果一致。CK及T1、T2、T3、T4处理温度均在50℃以上维持了14d或14d以上,符合粪便无害化卫生标准,最高温度分别达到了56.9、64.5、64.1、60.8、63.0℃,随后温度逐渐降低并趋于环境温度,表明堆肥趋于稳定^[10]。

2.2 含水率的变化

水分是影响堆肥效果的重要参数。从图2中含水率变化可以看出,对照和处理堆肥含水率变化一致,

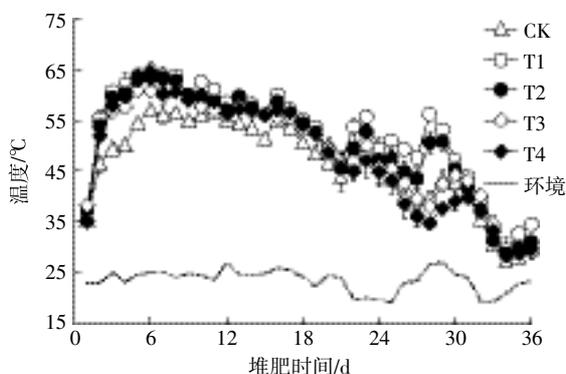


图1 堆肥过程中温度的变化

Figure 1 Change of temperature during composting process

均呈下降趋势。堆肥第36d时,除T3处理含水率为59%外,各处理含水率都保持在55%左右,T1至T4处理的堆肥含水率分别比初始含水率减少16.1%、16.3%、12.5%和15.0%,水分损失率分别为22.6%、22.8%、17.5%和21.1%;而对照堆肥第36d时,含水率仍在65%,比初始含水率减少11.1%,损失率仅为14.5%。堆肥过程中含水率的下降,一方面与堆体温度和高温维持时间有关^[9],另一方面可能与堆体的颗粒度及孔隙度有关。

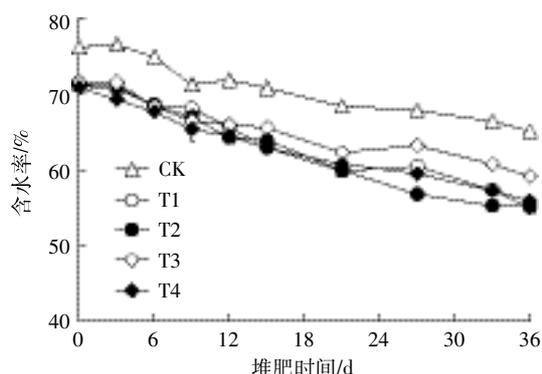


图2 堆肥过程中含水率的变化

Figure 2 Change of moisture content during composting process

2.3 pH值的变化

堆肥pH值受堆肥原料和条件的影响,只能作为堆肥腐熟的一个必要条件,而不是充分条件。从图3看出,对照和处理堆肥的pH值都呈现出下降直至趋于平稳的趋势,但是添加菌渣的各处理在第12d之后,pH值下降就开始趋缓,而对照处理的pH值则在第21d后才开始稳定。而且在堆肥中后期,添加菌糠处理的pH值均高于对照。这是因为添加菌糠降低了堆体的水分含量,增加了堆体的孔隙度,降低了NH₃挥发速率,减少了硝化菌硝化作用产生的H⁺和有机物分解产生的有机酸^[11]。堆肥结束时,各处理的pH值

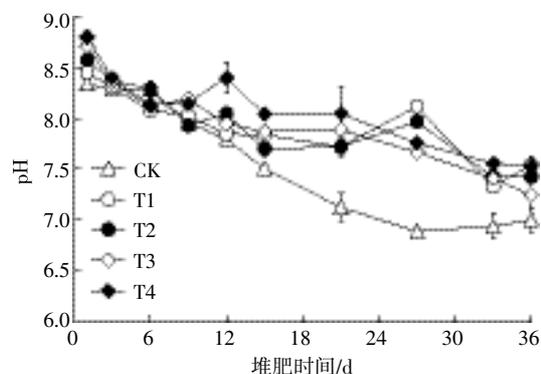


图3 堆肥过程中pH值的变化

Figure 3 Change of pH during composting process

均符合《有机肥料》(NY 525—2012)标准规定的 7.0~8.5 的要求。

2.4 电导率的变化

电导率(EC)表示堆肥过程中可溶性盐的变化。电导率反映了堆肥中可溶性盐的含量,堆肥产品电导率高于 $4000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时,会对植物生长产生负面影响,如发芽率低、萎蔫等^[12]。由图 4 可知,对照和各处理电导率在堆肥过程中呈不断上升的趋势,并在堆肥后期稳定在 $1600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右,均低于 $4000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,不会对植物产生毒害作用。电导率的逐渐升高是微生物对有机物的降解导致盐类物质产生的结果。另外从图 4 还可以看出,堆肥前和堆肥后,添加菌糠的各处理电导率均高于对照处理。这是因为菌糠是栽培食用菌后的剩余培养基,其中含有少许营养盐类,造成菌糠的电导率偏高,而猪粪渣是污水分离出的固体粪渣,其电导率较低。

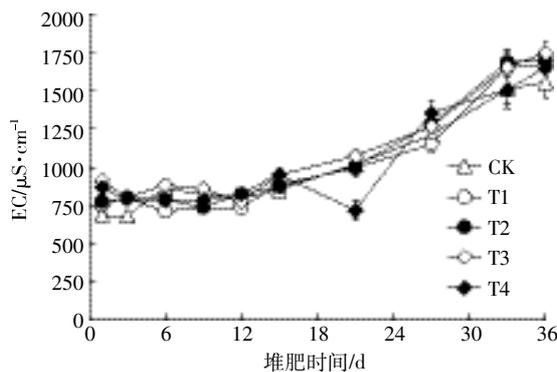


图 4 堆肥过程中 EC 值的变化

Figure 4 Change of EC value during composting process

2.5 种子发芽率指数的变化

相对于其他的理化指标,种子发芽率指数(GI)是更能够直接反应堆肥浸提液对于植物毒性的指标,因为未腐熟的堆肥浸提液含有高浓度的 NH_4^+ 、小分子有机酸、重金属等有毒物质对植物种子的生长有很强的抑制作用。理论上,当 $\text{GI} \geq 100\%$ 时,可以认为堆肥对植物没有毒性。但一般认为:当 $\text{GI} > 50\%$ 时,可以判定堆肥对植物基本没有毒性;当 $\text{GI} > 80\%$ 时,堆肥对植物完全没有毒性。从图 5 可以看出,整个堆肥过程中对照和处理均维持了较高的 GI,说明堆肥条件适宜,堆肥过程中没有植物毒性物质的积累。堆肥结束时,对照和处理种子发芽率均达到了 70% 以上,其中对照组的最高,为 97%,各处理依次为 76%、70%、74% 和 74%。测定结果也说明猪粪渣的生物毒性较低,而菌渣毒性物质要高于猪粪渣,添加菌渣反而降低了堆肥的 GI。这是因为猪粪渣是猪粪经水洗后的污水再经

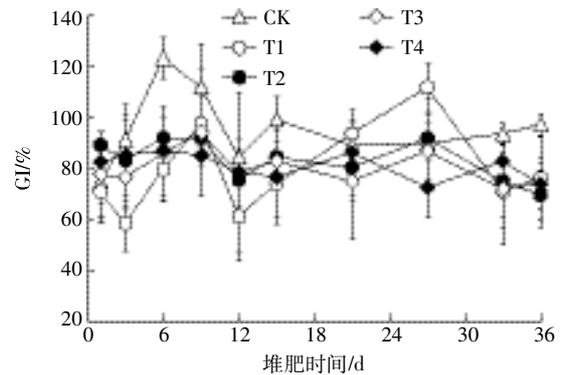


图 5 堆肥过程中 GI 的变化

Figure 5 Change of GI during composting process

固液分离机分离出的固体物质,水洗过程中去除了猪粪中的生物毒性物质。

2.6 干物质降解率的变化

堆肥是微生物分解利用有机物及转化成腐殖质的过程。堆肥过程中灰分的总量保持不变,干物质降解率的变化反映了堆肥中有机物的降解程度,干物质降解率越高,堆肥稳定度越高,堆肥过程进行得越彻底^[13]。从表 2 可以看出,随着菌糠添加比例的增加,各处理的干物质降解率依次降低。这可能是因为菌糠经过栽培食用菌之后,其易降解物质已被真菌分解利用过,而剩余的物质主要以纤维素类物质为主,降解难度较大。堆肥结束时,对照和处理的干物质降解率依次为 43.6%、45.3%、42.7%、34.0% 和 31.1%。

表 2 不同处理干物质的降解变化情况

处理	CK	T1	T2	T3	T4
堆肥前干物质量/kg	71.5	104	112	119	132
堆肥后干物质量/kg	39.9	56.4	63.7	78.0	90.3
取样的干物质量/kg	0.81	0.86	0.87	0.89	0.96
干物质降解量/kg	30.8	46.7	47.4	40.1	40.7
干物质降解率/%	43.6	45.3	42.7	34.0	31.1

2.7 碳素平衡及 C/N 变化

碳素平衡及 C/N 变化情况见表 3。可以看出,堆肥后物料的有机碳含量相对堆肥前均有所下降,各处理下降幅度介于 $34\sim 55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这是堆肥后微生物迅速繁殖分解有机碳造成的,而对照则下降幅度明显,下降了 $128 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。堆肥前对照处理的有机碳含量最高,为 $561 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与其他处理相比差异显著;而堆肥后对照处理的有机碳含量最低,仅为 $433 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与其他处理相比差异显著。从表 3 还可以看出,有机碳损失率随着物料中添加菌糠比例的增加而减少,T4 处理的有机碳损失率为 35.8%,而对照则高达 56%,说明菌糠

中所含的有机质相对猪粪渣中的有机质更难降解。这是因为菌糠经过栽培食用菌之后,其易降解物质已经过真菌分解利用,剩余的物质主要以纤维素类物质为主,降解难度较大。表3中的C/N数据显示,堆肥后各处理物料的C/N均下降至17.7~18.8之间,而对照的C/N下降幅度较大,降至16.2。

2.8 养分变化

堆肥发酵过程中,堆肥物料随着有机碳的迅速分解,水分的损失,物质总量的减少,养分往往表现为“浓缩效应”,但是氮素除了“浓缩效应”以外还有氮素挥发损失^[14]。表4是堆肥前后物料养分变化情况。可以看出,堆肥后各处理和对照物料的全氮、全磷和全钾含量均有明显的增加,其中全氮含量增加范围为7.4~10.1 g·kg⁻¹,全磷含量增加范围为5.0~14.9 g·kg⁻¹,全钾含量增加范围为2.8~7.3 g·kg⁻¹,且全磷和全钾含量均随着菌糠添加比例的增加而减少。这可能是因为菌糠含有较多难以再降解的木质素等有机质,随着菌糠添加量的增加,堆肥的干物质降解率降低,表现为“浓缩效应”相对更弱,而猪粪渣所含的有机质相对容易降解,对照的“浓缩效应”更明显。从表4还可以看出,堆肥后对照及各处理的总养分符合《有机肥料》(NY 525—2012)标准,其中对照的总养分最高,达到了69.6 g·kg⁻¹。

表3 碳素平衡及C/N变化情况

Table 3 Carbon balance and the change of the C/N

处理	TOC 含量/g·kg ⁻¹		TOC 损失量			C/N	
	堆肥前(0 d)	堆肥后(36 d)	初始/kg	损失量/kg	损失率/%	堆肥前(0 d)	堆肥后(36 d)
CK	561±2a	433±3c	40.2	22.5	56.0	31.7	16.2
T1	555±2b	513±1a	57.8	28.3	48.9	29.5	18.3
T2	552±5bc	518±1a	61.7	28.3	45.9	28.8	17.7
T3	550±4bc	495±16b	65.7	26.5	40.4	28.2	18.0
T4	549±2c	509±6ab	72.1	25.8	35.8	27.9	18.8

注:不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different treatments. The same below.

表4 堆肥前后物料养分变化情况

Table 4 Change of the nutrient in material before and after composting

处理	总氮/g·kg ⁻¹		总磷/g·kg ⁻¹		总钾/g·kg ⁻¹	
	堆肥前(0 d)	堆肥后(36 d)	堆肥前(0 d)	堆肥后(36 d)	堆肥前(0 d)	堆肥后(36 d)
CK	17.7±0.3c	26.8±0.6b	14.6±0.4a	29.5±0.8a	6.00±0.02e	13.3±0.1b
T1	18.8±0.2b	28.0±1.2ab	12.0±0.6c	20.6±0.7b	7.07±0.13d	13.6±0.2b
T2	19.2±0.1ab	29.3±0.7a	13.1±0.5b	18.6±0.5c	9.04±0.06c	14.2±0.1a
T3	19.5±0.3a	27.5±0.2b	11.4±1.0c	18.1±0.2c	10.0±0.15a	14.2±0.4a
T4	19.7±0.4a	27.1±0.8b	10.2±0.3d	15.2±1.1d	9.62±0.05b	12.4±0.3c

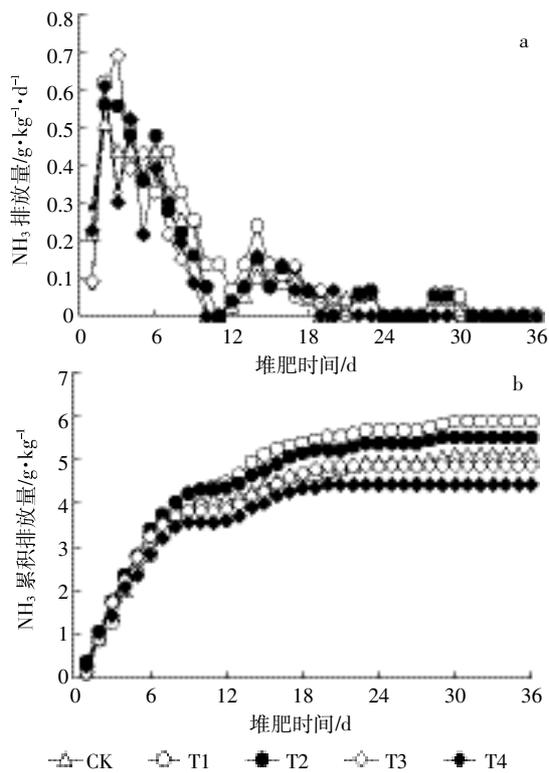
2.9 NH₃ 排放的变化

堆肥过程中,氮素损失是普遍存在的问题^[15],而NH₃挥发是最主要的途径^[16],研究表明猪粪堆肥过程中,NH₃排放引起的氮素损失可占到总氮损失的32.3%~50.0%^[17]。从图6a可以看出,对照和处理总体变化趋势一致,NH₃的排放高峰均出现在高温期前期,其中T2处理NH₃排放量的峰值较低。从图6b可以看出,T1至T4各处理的NH₃累积排放量分别为5.87、5.50、4.85、4.82 g。除对照外,随菌糠添加量的增加各处理间NH₃的累积排放量依次降低,与秦莉等^[18]和沈玉君等^[19]的研究结果一致;而不添加菌糠的对照处理NH₃累积排放量为5.11 g,介于T2和T3处理之间。这可能是由于对照堆体与T1、T2处理相比最高温度较低且高温期持续时间较短,以及堆体的初始pH值较低,造成NH₃的挥发量少于T1、T2处理;而T3、T4处理则是由于菌糠的量增加,增强了物理吸附作用从而减少NH₃的排放。这说明菌糠的添加比例大于0.3时,才有利于减少猪粪渣堆肥过程中NH₃的排放。

3 讨论

堆肥工程是一个系统而且复杂的过程,堆肥品质、腐熟度及NH₃排放的主要影响因素有温度、水分、pH值和EC值等。

堆肥的温度变化直接反映堆肥发酵是否正常,同时也是影响NH₃排放的重要因素^[20]。本研究中对照处理即单纯猪粪渣堆肥处理温度也可以正常升温并维持在50℃以上14 d,达到堆肥无害化效果,但其温度在堆肥开始后第4 d才达到50℃以上,而其他处理温度均在堆肥开始后第2 d即达到50℃以上。这是因为通过添加菌糠作为调理剂,降低了堆体的初始水分含量,从而缩短猪粪渣堆肥进入高温期的时间。本研究中T1和T2处理的氨累积排放量要高于T3和T4处理,是因为T1和T2处理维持高温时间较长,维

图6 堆肥过程中NH₃排放的变化Figure 6 Change of NH₃ emission during composting process

持在 50 ℃ 以上的天数分别是 23 d 和 21 d, 而 T3 和 T4 处理则分别是 20 d 和 19 d。

pH 值是影响堆体 NH₃ 排放的重要因素, 当堆体 pH 值较高时, NH₃ 挥发损失相对容易。虽然本研究中添加菌糠越多的 T3 和 T4 处理其初始 pH 值均高于其他处理, 但是并未增加 NH₃ 排放, 反而比 T1、T2 和对照处理更少。这可能是因为添加的菌糠量增多, 菌糠中丰富的孔穴和孔隙可以增加对 NH₃ 的吸附能力, 从而减少了 NH₃ 排放。这与许俊香等^[21]研究中添加沸石而减少堆肥氨挥发的效果一致。

堆肥过程中 T3、T4 处理的氨累积排放量最低, 但堆肥产品中总氮增加量却低于对照。这是因为菌糠中所含的物质较难降解, 从碳平衡和干物质降解率两个指标可以看出, T3 和 T4 处理的 TOC 损失率分别为 40.4% 和 35.8%, 而对照的 TOC 损失率达到了 56.0%; T3 和 T4 处理的干物质降解率分别为 34.0% 和 31.1%, 而对照则为 43.6%。因此 T3 和 T4 处理的养分“浓缩效应”相比对照更弱, 造成堆肥产品的养分浓度低于对照。这与李云蓓等^[22]的研究结果一致。

EC 值反映堆肥中可溶性盐的含量, 本研究中对照和各处理电导率在堆肥过程中呈不断上升的趋势, 并在堆肥后期稳定在 1600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右, 均远低于

4000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 并不会对植物产生毒害作用。这与 GI 的测定结果保持一致, 整个堆肥过程中对照和处理均维持了较高的 GI, 说明堆肥过程中没有过多植物毒性物质的积累。EC 值较低是因为作为主要原材料的猪粪渣是猪粪经冲洗后再经固液分离出的固体物质, 猪粪中的主要可溶性盐留在了水中, 所以猪粪渣中的可溶性盐含量较低。

猪粪渣与猪粪相比在许多理化性质上有差异, 本研究将猪粪渣作为堆肥的主要原料, 结果表明猪粪渣堆肥具有较好的理化性质, 其 EC 值低, GI 高, 同时易于生物降解, 单纯以猪粪渣直接堆肥的对照处理其干物质降解率较高, 仅次于 T1 处理, 达到了 43.6%, 而其有机碳损失率最高, 达到了 56%。最终堆肥后的总养分也最高, 达到了 69.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各项指标也均符合《有机肥料》(NY 525—2012) 标准, 说明猪粪渣可作为一种良好的堆肥原料。另外, 通过添加菌糠, 可以迅速使堆肥进入高温发酵, 而且菌糠中丰富的孔穴和孔隙可以增加对 NH₃ 的吸附能力, 从而减少了 NH₃ 排放。因此菌糠可以作为一种良好的调理剂来使用。

4 结论

添加菌糠有利于各堆肥处理缩短进入高温期的时间, 且有利于各处理堆肥的脱水; 随着菌糠添加比例的增加, 各处理的干物质降解率和有机碳损失率均降低; 堆肥后, 对照和处理的全氮、全磷和全钾含量均比堆肥前有所增加, 而其中全磷、全钾含量的增加量随着菌糠添加量的增加而相应减少; 当菌糠的添加比例大于 0.3 时, 有利于减少猪粪渣堆肥过程中 NH₃ 的排放; 在堆肥 36 d 后, 对照及各处理堆肥均达到腐熟, 且总养分和有机质均符合《有机肥料》(NY 525—2012) 标准。

参考文献:

- [1] 陶金沙, 李正东, 刘福理, 等. 添加小麦秸秆生物质炭对猪粪堆肥腐熟程度及温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1233-1240.
TAO Jin-sha, LI Zheng-dong, LIU Fu-li, et al. Effects of wheat straw biochar on maturity extent and greenhouse gases emissions during swine manure composting[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1233-1240.
- [2] 周文兵, 刘大会, 朱端卫, 等. 不同调理剂对猪粪堆肥腐殖质特性及元素含量变化的影响[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(6): 599-603.
ZHOU Wen-bing, LIU Da-hui, ZHU Duan-wei, et al. Effect of different conditioners on humification properties of pig feces compost and changes of their element forms[J]. *Journal of Huazhong Agricultural*,

- 2005, 24(6):599-603.
- [3] 倪媃媃, 陈志银, 程绍明. 不同填充料对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):204-208.
NI Mei-di, CHEN Zhi-yin, CHENG Shao-ming. Effect of different bulking agents on aerobic composting of swine feces[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(Suppl):204-208.
- [4] 程志强, 刘景华, 康立娟, 等. 废弃黑木耳菌糠特征及环境影响分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(7):45-48, 54.
CHENG Zhi-qiang, LIU Jing-hua, KANG Li-juan, et al. Characteristics and environmental impact of the waste material cultured auricularia auricular[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(7):45-48, 54.
- [5] 王建忠, 王颖. 利用菌糠生产有机肥的可行性分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5):2568-2570.
WANG Jian-zhong, WANG Ying. The Feasibility analysis of producing organic fertilizer by using mushroom bran[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(5):2568-2570.
- [6] 楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 等. 废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1):397-402.
LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, et al. Compositional variation of spent mushroom substrate during cyclic utilization and its environmental impact[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2016, 37(1):397-402.
- [7] 杨帆, 欧阳喜辉, 李国学, 等. 膨松剂对厨余垃圾堆肥 CH_4 、 N_2O 和 NH_3 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18):226-233.
YANG Fan, OUYANG Xi-hui, LI Guo-xue, et al. Effect of bulking agent on CH_4 , N_2O and NH_3 emissions in kitchen waste composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(18):226-233.
- [8] 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.
- [9] 薛智勇, 王卫平, 朱凤香, 等. 复合菌剂和不同调理剂对猪粪发酵温度及腐熟度的影响[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(6):354-358.
XUE Zhi-yong, WANG Wei-ping, ZHU Feng-xiang, et al. Effects of complex lively bacterial preparation and different attendant material on the fermentation temperature and maturity in pig manure[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(6):354-358.
- [10] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2):98-103.
LI Yan-xia, WANG Min-jian, WANG Ju-si. The maturity indexes and standards of organic solid waste composting[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1999, 20(2):98-103.
- [11] 张红玉, 路鹏, 李国学, 等. 秸秆对厨余垃圾堆肥臭气和渗滤液减排的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):248-254.
ZHANG Hong-yu, LU Peng, LI Guo-xue, et al. Effect of corn stalks addition on odors and leachate reduction during kitchen waste composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9):248-254.
- [12] 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, Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2):201-206.
- [13] 夏芸, 林辉, 王强, 等. 有机生活垃圾堆肥中物质组分减量差异及变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2463-2471.
XIA Yun, LIN Hui, WANG Qiang, et al. Differential reduction of different components of domestic organic wastes during composting process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2463-2471.
- [14] 王卫平, 朱凤香, 钱红, 等. 接种发酵菌剂和添加不同调理剂对猪粪发酵堆肥氮素变化的影响[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(5):276-279.
WANG Wei-ping, ZHU Feng-xiang, QIAN Hong, et al. Effect of inoculating microorganism agent and adding different attendant agents on changes of nitrogen during composting of pig manure[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(5):276-279.
- [15] 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.
- [16] 林小凤, 李国学, 贺琪, 等. 堆肥化过程中氮素损失控制材料的添加试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):975-978.
LIN Xiao-feng, LI Guo-xue, HE Qi, et al. Materials of controlling nitrogen loss during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):975-978.
- [17] El Kader N A, Robin P, Paillat J M, et al. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14):2619-2628.
- [18] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2668-2673.
QIN Li, SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2668-2673.
- [19] 沈玉君, 李国学, 任丽梅, 等. 不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1814-1819.
SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. The impact of composting with different aeration rates on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1814-1819.
- [20] 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.
- [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.
- [22] 李云蓓, 李伟光. 不同类型的外加碳源对污泥堆肥过程氮素损失的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2):104-109.
LI Yun-bei, LI Wei-guang. Influence of carbon-rich amendments on nitrogen losses during sewage composting[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(2):104-109.