

不同处理对高含水率奶牛粪便好氧堆肥的影响

邵 森¹, 杨淑英², 张增强², 康 军¹

(1.西北农林科技大学资环学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:针对奶牛养殖场粪便含水率高,堆肥处理成本高的特点,采用以干燥玉米秸秆为调理剂,在较高初始含水率条件下(70%~80%),进行了强制通风堆肥槽和翻转式堆肥仓的对比试验,并且探讨了晾晒脱水作为预处理对堆肥效果的影响。结果表明,各处理堆体升温迅速,且均在 50℃以上维持 8~12 d,满足堆肥无害化的卫生标准(GB 7959—1987)要求。至堆肥结束时,各处理含水率均降至 40%以下,C/N 均降至 20 以下,WSOC 均低于 16 g·kg⁻¹,NH₄⁺-N 含量均低于 0.4 g·kg⁻¹;除采用堆肥槽在初始含水率为 65%下堆肥 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N>3 尚未腐熟完全外,其他处理 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 均小于 0.5,腐熟情况较好;所有处理的 GI 均大于 50%,其中采用堆肥槽在较高初始含水率堆肥和晾晒预处理后堆肥 GI 已达 80%,基本消除了植物毒性。采用较为开放的堆肥槽时,以玉米秸秆作调理剂,在较高的初始含水率条件下堆肥效果更好;以晾晒脱水作为预处理后堆肥,可减少所需调理剂的用量,节约了堆肥的成本。

关键词:奶牛粪便;含水率;玉米秸秆;晾晒;堆肥

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0982-08

Effect of Different Treatments on Composting of High Water Content Dairy Manure

SHAO Miao¹, YANG Shu-ying², ZHANG Zeng-qiang², KANG Jun¹

(1.College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.College of Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In view of the characteristics of high water content of the dairy manure, it is uneconomical to compost it with the amendment of lower water content. In the present study, dairy manure was composted at a relatively high initial water content (70%~80%), using grinded dry maize straw as amendment, compared the forced aeration static bed composting with the rotating aerobic composting, as well as the effect of air-drying dehydration as pre-treatment on composting. The results showed that the thermophilic temperatures of all treatments were attained soon after the composting start and maintained above 50℃ for 8 to 12 d, which was enough to satisfy the requirements of sanitary standard for the non-hazardous (GB 7959—1987). At the end of composting, the water content declined below 40%; the C/N ratio, WSOC and NH₄⁺-N content below 20, 16 g·kg⁻¹ and 0.4 g·kg⁻¹, respectively. Moreover, the NH₄⁺-N/NO₃⁻-N of all treatments except that the treatment was composted in static bed equipment at lower initial water content were less than 0.5, indicated that these treatments matured very well. The germination test showed that the GI of all treatments were more than 50%, moreover, the treatment by static bed equipment at relatively high initial water content and air-drying dehydration as pre-treatment composting attained to 80%, indicated that composting had eliminated the phytotoxicity of the compost. It is better to compost of dairy manure and grinded dry maize straw at relatively high initial water content in static bed equipment. It is cost effective to compost directly with the dairy manure of air-drying dehydration pre-treatment which could reduce the amount of compost amendment.

Keywords: dairy manure; water content; maize straw; air-drying; composting

随着我国奶牛养殖业的不断扩大和集约化程度的不断提高,奶牛养殖场粪污的处理问题凸显。由于

养殖场多分布在城乡结合地区,没有足够的土地容纳数量如此庞大的粪污,且因粪便含水率高,不利于远距离运输,或被肆意堆放占用大面积场区土地,或未经任何处理就被随意堆放在路边沟旁,不仅产生恶臭气味,滋生蝇虫、病原菌,还污染空气、土壤和水源等^[1],带来严重的环境问题。同时,牛粪本身又含有大量有机质和丰富的氮、磷、钾和微量元素等^[2],如果进

收稿日期:2009-11-02

基金项目:陕西省攻关项目(2008K01-03)

作者简介:邵 森(1983—),男,安徽淮北人,在读硕士,主要从事固体废物处理方面的研究。E-mail:ahhuaibeism@163.com

通信联系人:张增强 E-mail:zhangzq58@126.com

行适当的处理与利用,则是良好的有机肥源。好氧堆肥法是研究较多、应用广泛且被认为是最具前景的有机废物处理方法之一^[3-4]。

由于集约化奶牛养殖场大多采用水冲粪的清粪方式,使粪污的含水率常高达 82.6%~95.7%(w/w)^[5-6],远高于通常堆肥适宜的含水率(55%~65%(w/w)),这也给粪污的堆肥化处理带来不便,因此需要预先脱水处理或加入大量干燥的调理剂来调整含水率至合理范围,这也会给实际堆肥生产带来较高的成本^[6,14],使本来就投资巨大、入不敷出的堆肥企业难以维持。

前人对于用奶牛粪便堆肥做了大量研究^[7-12],但对于在实际生产中,奶牛粪便含水率高、难于处理的特点关注不够。堆肥化处理奶牛粪便的关键在于含水率的控制^[6,13-14],而在较高的初始含水率条件下^[15-16],采用适当的堆肥工艺,在不影响堆肥效率和堆肥品质的前提下,可以显著减少调理剂的用量,降低堆肥成本。本文研究了不同初始含水率及不同堆肥方式对堆肥过程的影响,为合理选择堆肥工艺和奶牛粪便无害化与资源化处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 堆制材料

本试验所用奶牛粪便取自杨凌昇原奶牛养殖场的新鲜牛粪,以塑料桶装盛取回。玉米秸秆购自杨凌示范区徐西湾村,经晒干后粉碎(粒径小于 0.5 cm)备用。试验材料的基本理化性质见表 1。

表 1 供试原料的基本性质

Table 1 Basic properties of raw materials in composting

试验材料	含水率/%	干物质/%	总有机质/%	总碳/%	总氮/%	碳氮比
牛粪一	86.7	13.7	90.1	50.1	2.37	21.1
牛粪二	82.7	17.3	81.0	45.0	3.26	13.8
牛粪三	81.2	18.8	82.6	45.9	2.74	16.8
玉米秸秆	10.1	89.9	94.2	52.3	1.17	44.7

1.2 试验方法

试验所采用堆肥槽长 100 cm, 宽 50 cm, 高 80 cm, 有效容积 400 L^[17]; 翻转式堆肥仓设计参数为 80 cm×40 cm×40 cm, 有效容积为 120 L。试验共设置 5 个处理, 因试验条件限制分 3 批进行, 堆肥原料及配比见表 2。通风方式: 主发酵期通风采用离心风机正压间歇式鼓风, 鼓风机的功率为 100 W, 风压为 300 Pa, 风量为 0.055 m³·min⁻¹, 满足堆肥供氧、降温、降低含水率的要求, 另外鼓风机连接自动控制装置, 根据

堆温反馈调节鼓风机工作, 调整通风量; 二次发酵期将堆料移入自然堆肥反应器自然堆置腐熟。翻堆方式: 分别在堆肥的第 0、1、3、5、7、10、14、21、30、45、60、75 及 90 d 翻堆混匀。每日 9:00、15:00 及 21:00 记录环境温度和堆体温度, 并计算日平均温度。从堆肥开始的第 0、3、7、14、21、30、45、60 及 90 d 采集样品, 每次将堆料混匀后分多点取样, 然后充分混合, 部分鲜样在 4 ℃保存并作及时测定, 部分经 40 ℃烘干 24 h 粉碎后, 过 60 目筛储存备用。

表 2 不同堆肥处理的物料配比及初始含水率

Table 2 Material ratio and initial water content of composting treatments

试验处理	水分调节方式	物料配比 (鲜重 w/w)	堆肥装置	初始含水率
处理 1b	玉米秸秆	50 kg 牛粪:15 kg 秸秆	堆肥槽	68.2%
处理 2a	玉米秸秆	50 kg 牛粪:7 kg 秸秆	堆肥槽	77.4%
处理 3a	玉米秸秆	50 kg 牛粪:19 kg 秸秆	翻转式堆肥仓	65.3%
处理 4b	玉米秸秆	50 kg 牛粪:6.5 kg 秸秆	翻转式堆肥仓	73.6%
处理 5c	晾晒脱水/玉米秸秆	50 kg 牛粪(晾晒失水后):10 kg 秸秆	堆肥槽	65.5%

注: a 牛粪一; b 牛粪二; c 牛粪三。

1.3 测定项目与方法

pH 和电导率采用新鲜堆肥样品与去离子水以固液比 1:5(m/V)浸提 1 h 后离心过滤, 分别用 pH 计和电导率仪测定; 含水率取一定量鲜样于烘箱中 105 ℃下烘 24 h, 至恒重; 总有机质含量的测定采用干样灼烧减重法(550 ℃, 4 h); 总氮(TN)采用凯氏定氮法; 水溶性有机碳(WSOC)用干样与去离子水以 1:10(m/V)混合振荡浸提后, 离心过滤, 以重铬酸钾容量法测定; 铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用鲜样与 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液以固液比 1:5 (m/V) 浸提 1 h, 离心后过 0.45 μm 微孔滤膜, 分别用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定^[18]; 种子发芽指数(GI)的测定参照文献[19]。

2 结果与分析

2.1 不同处理对堆肥温度的影响

堆肥过程中, 温度控制的目标是使堆肥无害化和稳定化, 其变化也反映了堆肥微生物的活性变化和堆肥过程所处的状态。堆肥开始时, 由于微生物大量分解易降解有机物和含氮化合物用于细胞合成, 同时产生大量的 CO₂、H₂O 和 NH₃, 并释放出大量的热量而使堆体温度迅速升高。堆体温度在 55 ℃保持 3 d 以上(或 50 ℃以上保持 5~7 d)是杀灭堆料中所

含致病微生物,保证堆肥卫生合格和堆肥腐熟的重要条件^[21]。

从图 1 可以看出,各处理堆体温度在堆肥开始 24 h 后均进入高温期,维持时间都超过 7 d,满足堆肥无害化的卫生标准要求。其中,处理 2 和处理 4 由于初始含水率较高,升温相对较慢,堆温达到 50 ℃所需时间分别为 28 和 18 h,但高温期持续时间较长,分别达 9 和 12 d;处理 1 与处理 3 堆温达到 50 ℃所需时间分别为 15 和 10 h,高温期分别持续 8 和 9 d;处理 5 升温最为迅速,在堆肥开始后 6 h 堆温就达到 50 ℃,且高温期持续 9 d。因此采用晾晒脱水处理不但可以减少调理剂用量,而且可以提高堆肥效率,从而降低堆肥成本。

高温期过后,微生物活性下降,有机质分解速率减慢,又因堆体较小易受环境温度变化影响,所有处理堆温下降均较快。在堆肥开始约两周后,堆温略高于环境温度并逐渐趋于稳定,可初步认为堆肥达到腐熟^[3]。

2.2 不同处理对含水率变化的影响

堆肥含水率是堆肥过程的一个非常重要的参数,通常认为的最佳水分含量为 50%~60%^[22],但也有报

道认为含水率在 60%~70%时微生物活性最大^[23,25],因此堆肥最适含水率也会因堆肥原料的差异,堆肥工艺及堆肥时间的变化而有较大的差异^[24]。

由图 2 可以看出,随着堆肥的进行,各处理间含水率均呈下降趋势,在堆肥结束时降至 40%左右(除处理 1 外)。在堆肥初始阶段,处理 2 与处理 4 由于初始含水率较高,且在堆肥过程中微生物会分解有机质产生水分,而使含水率略有增加;处理 1、3 和处理 5 则因通风和翻堆,水分随热量大量散失,含水率急剧

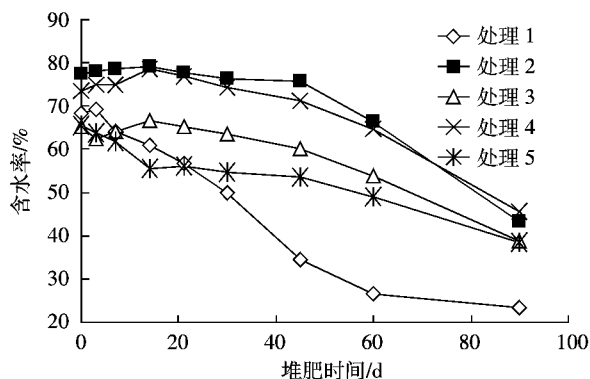


图 2 堆肥过程中含水率的变化

Figure 2 Changes of water content during composting

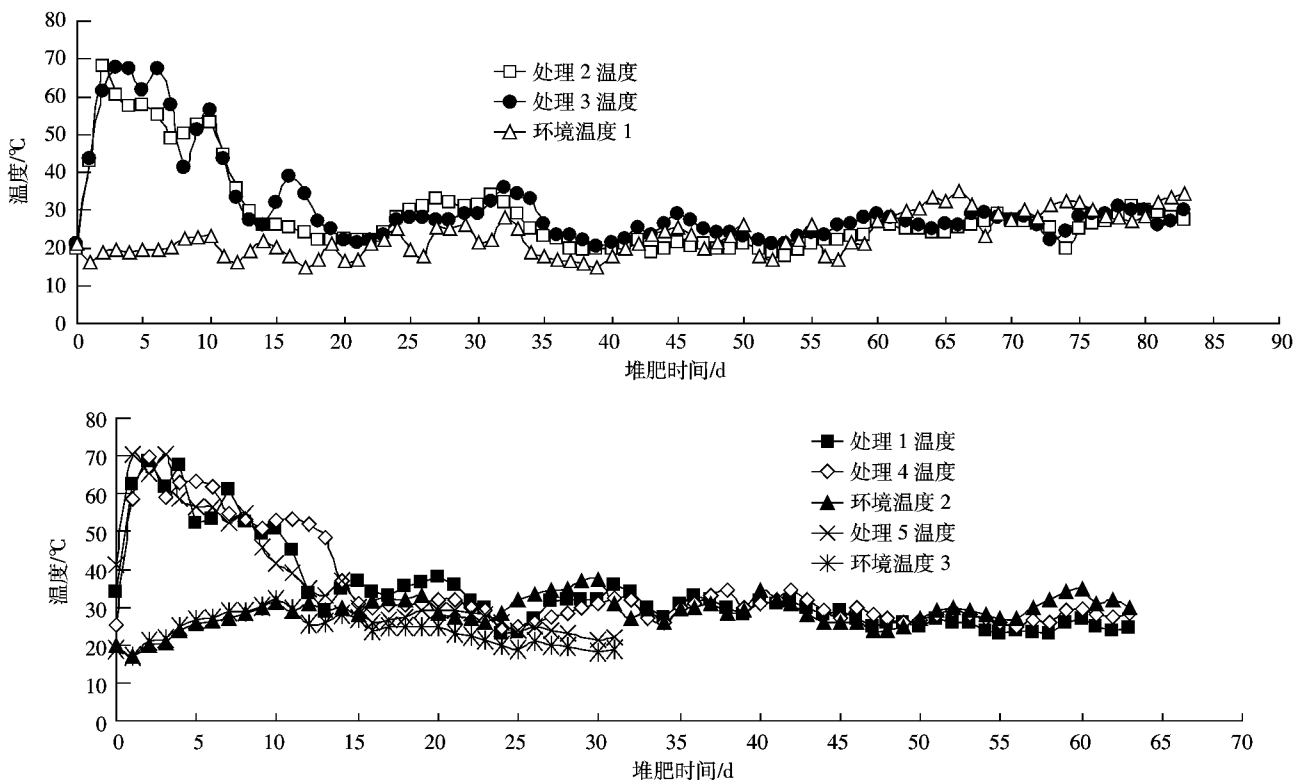


图 1 堆肥过程中温度的变化

Figure 1 Changes of temperature during composting

下降,特别是在采用堆肥槽系统时,由于相对开放,有利于水分的蒸发损失,但处理1也因含水率的过量损失而限制了微生物的活性,使有机质降解不完全,堆肥可能未完全达到腐熟^[16]。

2.3 pH值和电导率的变化

堆肥微生物活性较高的pH范围为6.7~9.0^[22]。由图3a可以看出,堆肥过程中各处理的pH范围均在7.8~9.0之间,满足好氧堆肥对pH的要求。堆肥初期pH急剧增大是由于微生物活动使有机酸大量分解,蛋白质水解和氨化作用产生大量氢氧根^[26]。处理1、4与处理5在堆肥开始时pH有下降的现象,这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CO₂有关。一次发酵过后,堆肥pH逐渐下降,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;堆肥过程中形成了碳酸氢盐缓冲体系,使得堆肥后期pH稳定在8.3左右^[25-26]。

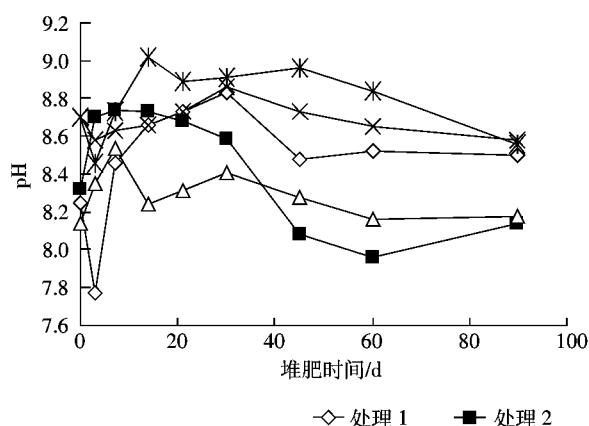


图3a 堆肥过程中pH值的变化

Figure 3a Changes of pH value during composting

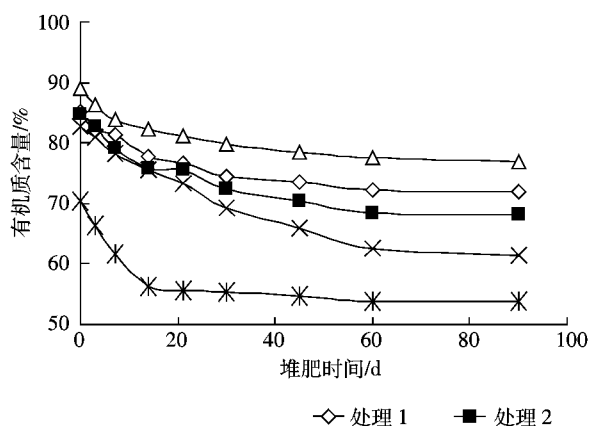


图4a 堆肥过程中有机质含量的变化

Figure 4a Changes of TOM content during composting

由图3b可知,在堆肥过程中,各处理的电导率均呈增加的趋势。由于有机质的矿化作用及有机酸的溶解作用,可溶性盐大量产生,而且不会因挥发或下渗而损失,其浓度会不断增大;也有研究认为电导率的增加与微生物活动有关,在高温期大量营养盐被微生物利用,因此水溶性盐含量较低,随着分解作用的进行,微生物活性下降,不能利用的盐分便逐渐增多并以水溶态积累下来^[26]。

2.4 总有机质含量的变化

由图4a可以看出,各处理有机质含量整体均呈现下降趋势,堆肥结束时有机质损失量达初始值的60%左右,而且主要发生在堆肥主发酵期,高达初始含量的40%(图4b),这是由于在这一时期,大量易降解的有机物如简单碳水化合物、脂肪和氨基酸等迅速被微生物利用而降解,其他较复杂的有机物如纤维素、半纤维素、木质素和蛋白质则被部分以较低的降解速率分解^[3];在堆肥腐熟期,有机质含量变化逐渐趋

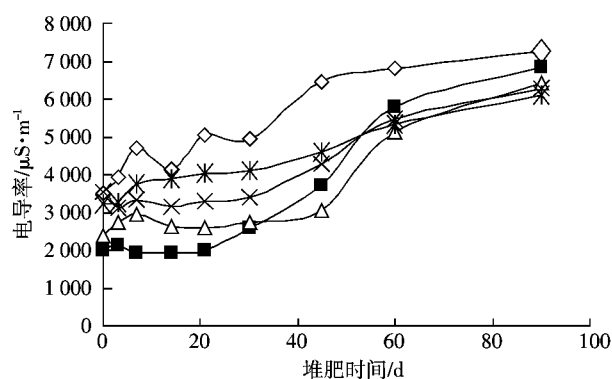


图3b 堆肥过程中电导率的变化

Figure 3b Changes of EC during composting

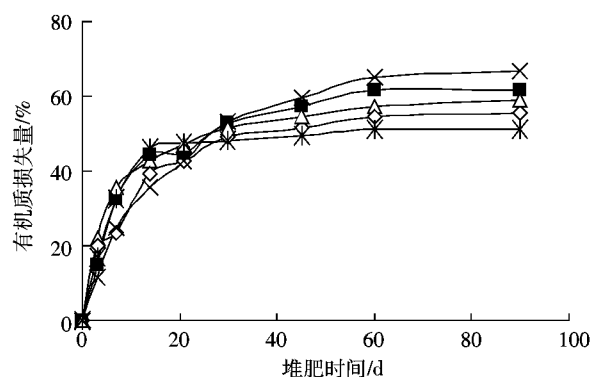


图4b 堆肥过程中有机质损失率的变化

Figure 4b Changes of OM loss rate during composting

于平稳,这也与堆体温度的变化相符。

2.5 总氮含量的变化

由图 5 可以看出,堆肥过程中 TN 含量先降低后增加(除处理 1 外),这是由于堆肥开始时,堆料的 pH 值较高(8.5 左右),而且微生物矿化作用产生了大量的铵根,在较高的堆肥温度和湿度下大量的 NH_3 挥发逸出,造成氮素的大量损失,尤以处理 4 最为明显;处理 1 由于 pH 和湿度值相对较低,氮素损失相对较少。又因为有机物的矿化分解引起干物质的减少,以及氮素损失的减少而使 TN 含量“相对浓缩”,所以 TN 含量逐渐增加。也有学者认为,在堆肥后期,固氮菌也有助于堆肥产品 TN 含量的升高^[9]。

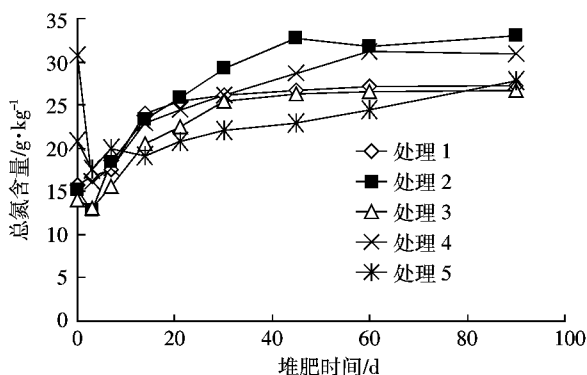


图 5 堆肥过程中总氮含量的变化

Figure 5 Changes of total N content during composting

2.6 碳氮比的变化

由图 6 可知,堆肥过程中 C/N 比整体呈下降的趋势,但处理 1 在堆肥的初期 C/N 比有所增加,这可能与前面所述的氮素的损失速率大于干物质的降解速率有关;而后,由于有机质分解,碳素以 CO_2 形式不断损失,而氮素损失较少,堆肥的 C/N 比逐渐下降。

对于初始 C/N 比在 25~30 的堆肥,当其下降到

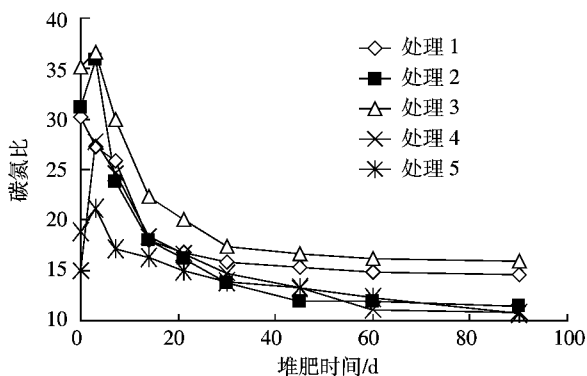


图 6 堆肥过程中碳氮比的变化

Figure 6 Changes of C/N ratio during composting

15~20 以下时,可认为已达到腐熟;小于 10 被认为腐熟情况较好^[13,22]。堆肥结束时,各处理 C/N 比均降至 20 以下,且处理 2、4 与处理 5 分别降至 11.5、10.8 和 10.7,腐熟情况较好;处理 1 和处理 3 由于初始 C/N 比较高,C/N 比降至 15 左右,堆肥亦基本达到腐熟。

2.7 水溶性有机碳(WSOC)含量的变化

堆肥过程中,水溶性有机碳含量呈先增加后降低的趋势(见图 7)。这可能由于在堆肥初期微生物在分解水溶性有机物的同时也会部分分解纤维素和半纤维素等大分子不溶性有机物,使其部分转化为小分子可溶性有机物而使 WSOC 含量略有增加;而后被大量微生物分解利用,因此逐渐降低。堆肥过程是微生物对原料中水溶态有机质进行矿化的过程,WSOC 的变化与 C/N 比的变化具有很好的相关性,它是判定堆肥腐熟度的又一重要参数^[27]。堆肥初期,大量水溶性有机质迅速分解矿化,碳素以 CO_2 形式释放,因此 C/N 比急剧降低;而在腐熟期,水溶性有机质含量较低,微生物活动减弱,碳素损失较少,C/N 比变化趋于平缓。

堆肥结束时,各处理 WSOC 含量均低于 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,认为堆肥基本达到腐熟 (≤ 16),且处理 2 与处理 4 WSOC 含量降至 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N 比降至 11 左右,堆肥腐熟情况均较好^[22];处理 1 与处理 5 采用堆肥槽在较低的初始含水率条件下堆肥,水分损失较快,腐熟期含水率过低限制了微生物活动,堆肥结束时,WSOC 含量约为 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,虽然 C/N 比均小于 20,但以 WSOC 含量判断时,腐熟情况较差。因此在判定腐熟度时,应综合考虑多个腐熟度指标,而不能根据单个指标判断^[28]。

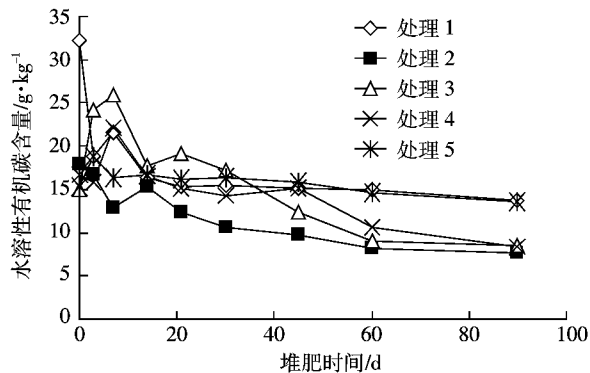


图 7 堆肥过程中水溶性有机碳的变化

Figure 7 Changes of WSOC during composting

2.8 铵态氮与硝态氮的变化

由图 8 可以看出,不同处理间, NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量的变化趋势很显著;堆肥开始时, NH_4^+-N 迅速增

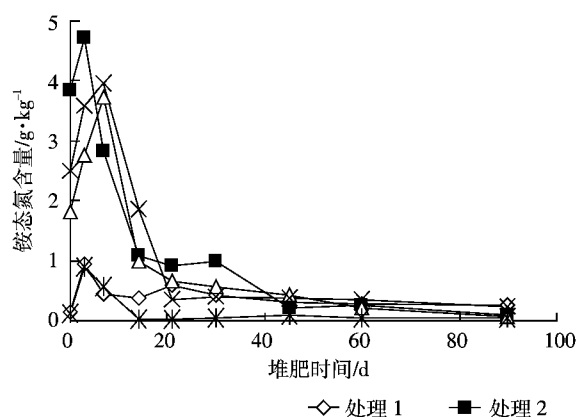


图 8a 堆肥过程中铵态氮含量的变化

Figure 8a Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content during composting

加并在第3~7 d达最高点(图8a),这是由于微生物活动加剧了有机氮的分解,从而产生大量 NH_4^+ 。高温期过后,堆肥 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 因微生物的同化作用、 NH_3 挥发损失及硝化作用的进行而逐渐降低,甚至消失。

堆肥起始阶段, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量极低,接近于0,这是由于在高温发酵阶段,较高的温度抑制了硝化细菌的生长活动,影响了硝化作用的进行。在堆肥温度下降至20~35℃时,堆肥进入腐熟期,硝化作用可以顺利进行,促进了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化^[25-26,28-30],堆肥中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量迅速增加(图8b)。其中,处理2与处理4因初始含水率较高,微生物活性较大,更有利于有机氮的分解与矿化以及硝化作用的进行,处理1因采用堆肥槽,且初始含水率较低,水分损失较快,堆肥后期含水率过低限制了微生物硝化作用的进行,因而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较低。

堆肥结束时,各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均低于 $0.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,堆肥基本达到腐熟;且处理2、3、4、5的 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}<0.5$,而且处理2、4的C/N比均小于12,WSOC含量均小于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,堆肥腐熟情况较好;处理1的 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}>3$,且C/N比和WSOC含量相对较高分别为14.6、13.7 $\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,综合判定其并未完全腐熟^[22,28]。

2.9 种子发芽指数的变化

种子发芽试验是测定堆肥植物毒性的直接而有效的方法^[3]。Zucconi等^[20]提出用水莖种子发芽指数的生物学试验来评价堆肥毒性作用,并认为当 $\text{GI}\geq 50\%$ 时堆肥基本达到腐熟,当 $\text{GI}\geq 80\%$ 时,堆肥完全腐熟,已消除对植物的毒性。本试验采用雪里蕻种子的发芽指数来评定堆肥的腐熟程度。由图9可以看出,堆肥可以显著降低植物毒性,在堆肥第30 d时,由于低分

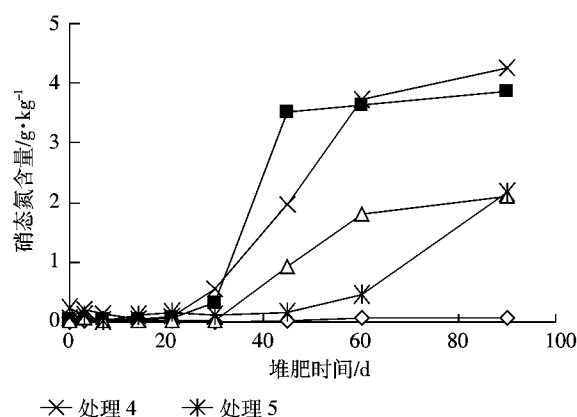


图 8b 堆肥过程中硝态氮含量的变化

Figure 8b Changes of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content during composting

子有机酸、 NH_4^+ 等植物毒性物质在微生物同化作用、 NH_3 挥发及硝化作用的共同作用下,含量逐渐降低,所有处理的GI均大于50%。

堆肥结束时,处理2和处理5的C/N比小于12, $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 小于0.5,且GI达到了80%,基本消除了植物毒性,堆肥已达腐熟;处理1的C/N比、WSOC含量及 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均较高,分别为14.6、13.7 $\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、3.95,而GI最低(63.7%),略高于起始值(51%),仍有较大的植物毒性。

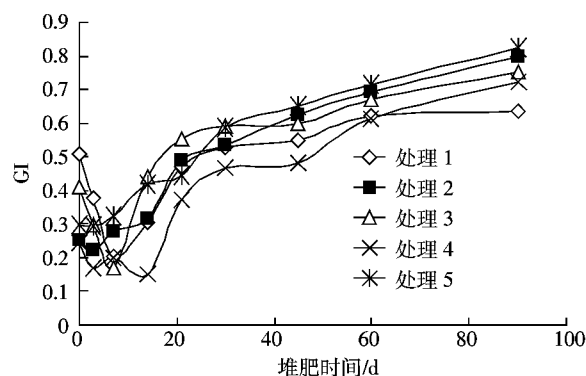


图 9 种子发芽指数的变化

Figure 9 Changes of GI during composting

3 结论

(1)对于高含水率的奶牛粪便,以玉米秸秆为调理剂在较高的初始含水率条件下(70%~80%),并辅以合适的通风翻堆,可以顺利达到无害化与稳定化的目的。而且由于水分散失较快,采用堆肥槽堆肥时较高的初始含水率效果更好。

(2)通过晾晒脱水的预处理,可以在较短时间内降低堆肥原料水分,然后再加入调理剂混合后堆肥,

从而大大减少调理剂的用量,节约了堆肥的成本,提高了堆肥的效率。

(3)各处理堆体升温迅速,且在 50℃以上保持 8~12 d,满足堆肥无害化的卫生标准要求;较高的初始含水率条件更利于堆肥过程中微生物活动的进行;由于干物质的减少而使总氮“相对浓缩”,堆肥结束时,各处理总氮含量均有所升高。

(4)至堆肥结束时,各处理 C/N 比均低于 20, WSOC 含量均低于 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NH_4^+-N 含量均低于 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处理 2、3、4、5 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} < 0.5$,堆肥达到了腐熟;处理 1 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} > 3$,未达到完全腐熟。

(5)所有处理的 GI 均大于 50%,其中处理 2 和处理 5 达到了 80%,已基本消除了植物毒性;处理 1 的 GI 最低(63.7%),仍有较大的植物毒性。

参考文献:

- [1] 王凯军. 畜禽养殖污染防治技术与政策[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:7-14.
WANG Kai-jun. Countermeasures and policies of prevention and treatment husbandry industry pollution[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:7-14.
- [2] 单德臣,单德鑫,许景钢,等. 牛粪好氧生物处理条件分析[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(4):554-558.
SHAN De-chen, SHAN De-xin, XU Jing-gang, et al. Conditions on aerobic bio-treatment of cow manure[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(4):554-558.
- [3] 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.
CHAI Xiao-li, ZHANG Hua, ZHAO You-cai, et al. Solid waste composting theory and technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:16-18.
- [4] 王 岩. 养殖业固体废物快速堆肥化处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:8-11.
WANG Yan. Husbandry Industry solid waste high-rate composting treatment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:8-11.
- [5] 杨邦杰. 农业生物环境与能源工程[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2002:316-328.
YANG Bang-jie. Agricultural biological environmental and energy engineering[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2002:316-328.
- [6] Mason I G, Mollah M S, Ming-feng Zhong, et al. Composting high moisture content bovine manure using passive aeration[J]. *Compost Science & Utilization*, 2004, 12(3):249-267.
- [7] 夏炜林,黄宏坤,漆智平,等. 不同堆肥方式对奶牛粪便处理效果的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊 2):215-219.
XIA Wei-lin, HUANG Hong-kun, QI Zhi-ping, et al. Experimental studies on dairy manure treatment by static bed composting and microbe reagent inoculating[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(suppl 2):215-219.
- [8] 李玉红,王 岩,李清飞. 不同原料配比对牛粪高温堆肥的影响[J]. 河南农业科学, 2006, 11:25-27.
LI Yu-hong, WANG Yan, LI Qing-fei. Effect of different material ratio on high temperature composting of dairy manure[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2006, 11:25-27.
- [9] 于海霞,孙 黎,栾冬梅. 不同调理剂对牛粪好氧堆肥的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊 2):235-238.
YU Hai-xia, SUN Li, LUAN Dong-mei. Effects of different bulking agents on cattle manure composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(suppl 2):235-238.
- [10] 国洪艳,徐凤花,万书名,等. 牛粪接种复合发酵剂堆肥对腐植酸变化特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1231-1234.
GUO Hong-yan, XU Feng-hua, WAN Shu-ming, et al. Effects of inoculating complex microbial inoculants to cattle manure compost on dynamic characteristics of humic carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1231-1234.
- [11] 李玉红,王 岩,李清飞. 外源微生物对牛粪高温堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):609-612.
LI Yu-hong, WANG Yan, LI Qing-fei. Effect of inoculating microbes on composting process of cattle manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(suppl):609-612.
- [12] LI Xiu-jin, ZHANG Rui-hong, PANG Yun-zhi. Characteristics of dairy manure composting with rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:359-367.
- [13] Keener H M, Elwell D L, Reid G L, et al. Composting non-separated dairy manure-theoretical limits and practical experience[C]//Proceedings Eight Int. Sym. On Animal, Agr. And Food Processing Waste. Des Moines, Iowa. 2000:615-623.
- [14] Keener H M, Pecchia J A, Reid G L, et al. Optimizing design and operation of dairy manure composting systems using pilot and full scale kinetic studies. //the Ninth International Animal, Agricultural and Food Processing Wastes Proceedings of the 12-15 October 2003 Symposium. pp. 310-324.
- [15] Hanajima D, Kuroda K, Fukumoto Y, et al. Effect of addition of organic waste on reduction of *Escherichia coli* during cattle feces composting under high-moisture condition[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(14):1626-1630.
- [16] Zhu Neng-wu. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(15):1870-1875.
- [17] 曾现来,张增强,张永涛,等. 城市生活垃圾堆肥试验装置的设计[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(10):109-112.
ZENG Xian-lai, ZHANG Zeng-qiang, ZHANG Yong-tao, et al. Design of a composting reactor for municipal solid waste composting[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(10):109-112.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 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 and wheat straw[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(11):2269-2276.
- [20] Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. *Biocycle*, 1981, 22:54-57.
- [21] GB7959-1987, 粪便无害化卫生标准[S].
GB7959-1987, Sanitary standard for the non-hazardous treatment of night soil[S].
- [22] Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity: A review[J]. *Biore-source Technology*, 2009, 100(22):5444-5453.
- [23] 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]. *Biore-source Technology*, 2003, 94(2):131-137.
- [24] Richard T L, Hamelers H V M, Veecken A, et al. Moisture relationships in composting processes[J]. *Compost Science & Utilization*, 2002, 10(4):286-302.
- [25] Brito L M, Coutinho J, Smith S R. Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry[J]. *Biore-source Technology*, 2008, 99(18):8955-8960.
- [26] Cáceres R, Flotats X, Marfà O. Changes in the chemical and physico-chemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies[J]. *Waste Management*, 2006, 26(10):1081-1091.
- [27] Zmora-Nahum S, Markovitch O, Tarchitzky J, et al. Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(11):2109-2116.
- [28] 曾光明, 黄国和, 袁兴中, 等. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, YUAN Xing-zhong, et al. Composting environment organism and control[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [29] 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 Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamic changes of nitrogen forms in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):374-380.
- [30] 黄国锋, 钟流举, 张振钊, 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 Guo-feng, ZHONG Liu-ju, ZHANG Zhen-tian, et al. On nitrogen transformations and maturity during composting of pig manure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11):1459-1462.