

死猪堆肥处理通风率的优化试验

尚 斌, 陶秀萍, 董红敏*, 郭东坡, 郝凤佩, 黄文强, 王 悦

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

摘要:利用箱式堆肥法对死猪堆肥处理通风率参数进行优化, 试验设置通风速率为 100 、 80 、 $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 3 组处理, 每组处理 3 个重复。堆肥箱的长宽高尺寸均为 1 m , 每个箱体处理死猪质量为 $57.7 \sim 58.5 \text{ kg}$, 发酵原料为猪粪和秸秆。结果表明: 各处理日平均温度超过 55°C 的时间均达 35 d 以上, 满足粪便无害化的相关要求; 经 46 d 的堆肥发酵后, 死猪仅剩余部分骨骼, 3 组处理的死猪降解率(湿重)分别为 $(95.6 \pm 1.1)\%$ 、 $(94.6 \pm 2.2)\%$ 和 $(96.2 \pm 1.5)\%$, 不同处理无显著性差异; 堆肥过程不同处理的物料同一特性变化规律一致, 堆肥结束时物料中粪大肠菌群数为 $3 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 pH 值为 $8.3 \sim 8.4$ 、有机质含量(干基)为 $45.5\% \sim 51.1\%$, 均满足 NY 525—2012《有机肥料》行业标准中相关技术指标的要求。死猪堆肥处理的实际应用中, 选择 $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的通风率为宜。

关键词: 好氧堆肥; 无害化; 动物尸体; 资源化利用

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)10-2047-06 doi:10.11654/jaes.2014.10.024

Optimum Ventilation Rates for Pig Carcass Composting

SHANG Bin, TAO Xiu-ping, DONG Hong-min*, GUO Dong-po, HAO Feng-pei, HUANG Wen-qiang, WANG Yue

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Lab of Energy Conservation and Waster Treatment of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: The conventional disposal of dead animal carcasses is land burial in China. However, it poses a potential contamination risk to groundwater at burial sites. Composting carcasses not only greatly reduces the volume and mass of the wastes, but also destroys pathogens. Ventilation is a key factor influencing the composting efficiency. Here an experiment was conducted using composting bins to determine the optimum ventilation rate of dead pig composting. The dimensions of the composting bin were 1 m (length) $\times 1 \text{ m}$ (width) $\times 1 \text{ m}$ (height). Three ventilation rates of $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, $80 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ and $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, designated respectively as treatment 1, 2, and 3, were designed with 3 replicate composting bins each treatment. Dead pigs with a total weight of $57.7 \sim 58.5 \text{ kg}$ were put in the center of each bin containing mixture of corn stalks and pig manure. The composts obtained under average daily temperature over 55°C for 45 d , 35 d , and 43 d for treatment 1, 2 and 3, respectively, met the national standard. The degradation rates (wet basis) of dead pigs after 46 d fermentation were $(95.6 \pm 1.1)\%$, $(94.6 \pm 2.2)\%$ and $(96.2 \pm 1.5)\%$ for treatment 1, 2 and 3, respectively, with no significant differences observed among treatments. At the end of composting, the composts contained fecal coliform of $3 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$, pH of 8.3 to 8.4 , and organic matter (dry base) ranging between 45.5% and 51.1% . All values satisfied the China National Standards for Organic Fertilizer. The ventilation rate of $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ for dead pig composting is recommended.

Keywords: aerobic compost; harmless disposal; carcass; resource utilization

死畜禽的无害化处理是任何一个养殖场必须面对和解决的问题^[1]。目前, 死猪无害化处理主要包括深埋、焚烧、高温高压化制以及生物发酵四种方法^[2], 其

中堆肥发酵法利用堆肥产生的高温在有效杀死病原微生物的同时能够将动物尸体有效降解^[3-5], 且投资和运行成本低、处理效果好^[5-6], 目前在国外已经得到较多的研究和应用^[7-13]。

死畜禽堆肥处理的主要技术参数包括物料特性^[7-8, 14] (如粒径大小、 pH 、孔隙率等) 和管理参数 (如温度、通风率等)^[6, 15], 其中合理的通风不但能很好地维持死畜禽的有效降解^[4-5], 而且有利于死畜禽堆肥处理

收稿日期: 2014-03-19

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-36-10B); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303091)

作者简介: 尚 斌 (1981—), 男, 助理研究员, 研究方向为农业废弃物处理和资源化利用。E-mail: shangbin@caas.cn

* 通信作者: 董红敏 E-mail: donghongmin@caas.cn

的成本控制，是死畜禽堆肥处理最为关键的参数之一。国外多利用自然通风箱式堆肥系统，虽然不需要建立通风系统，但处理周期基本为 3 个月到 1 年^[13,15-16]，时间相对过长。习佳林等进行了强制通风静态箱式发酵系统处理死鸡的探索，处理周期为 74~89 d，死鸡分解率可达 95%以上^[4]。郭东坡等利用箱式试验对死猪堆肥的通风率进行探讨，设定 300、200、100 L·min⁻¹·m⁻³ 3 组处理，结果表明 3 种通风率的条件下发酵温度无显著差异，且死猪降解率均达到 95%以上，建议死猪堆肥处理的通风率不超过 100 L·min⁻¹·m⁻³^[5]。

本试验通过对死猪堆肥处理的通风率参数进行优化，研究更低的通风率对死猪堆肥处理效果的影响，并对堆肥处理过程的温度和物料特性进行分析，旨在为死猪堆肥处理技术相关参数的进一步研究和应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验设在北京市大兴区安定种猪场废弃物处理车间，所处理死猪来自北京安定种猪场，堆肥发酵原料为新鲜猪粪和玉米秸秆，按体积比 1:2 混合，其中猪粪取自北京市大兴区安定种猪场，玉米秸秆取自附近农村，自然风干后粉碎成长度 2~5 cm 的小段，基本特性见表 1。

1.2 试验装置

采用自制堆肥箱体，尺寸为 1 m×1 m×1 m(长×宽×高)，有效体积为 0.95 m³；材料为硬质 PVC 板，箱体外层加 5 cm 厚聚苯泡沫保温层；箱体顶部设有双坡型

盖子(可打开)。发酵箱底部设有送风管道，管道设有通风小孔，小孔直径约为 3 mm，通风管道上设置一硬质塑胶筛板，筛板上有直径为 5 mm 左右的小孔，用以将气体均匀散布，同时避免物料堵塞通气管(图 1)。

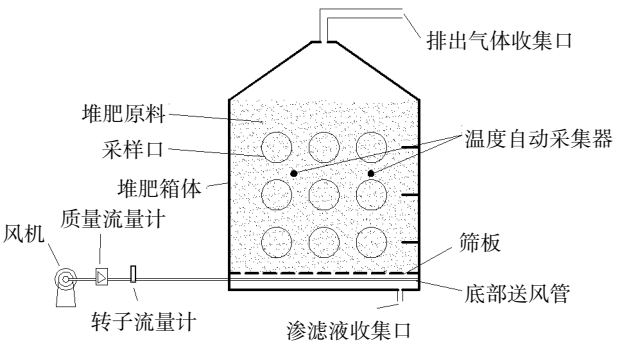


图 1 堆肥箱体示意图
Figure 1 Sketch diagram of composting bin

试验所用风机为漩涡风机(2PB610-H16, 苏州风力士)，正压送风，通风率采用热式质量流量计(RK100, 北京科力博奥仪表技术有限公司)和玻璃转子流量计(LZB-40 和 LZB-60, 上海天湖仪表厂)进行精确控制和计量。

1.3 试验设计

试验于 2013 年 5 月 15 日至 6 月 30 日进行，对通风率设 3 个处理，分别为 100 L·min⁻¹·m⁻³(处理 1)、80 L·min⁻¹·m⁻³(处理 2)和 60 L·min⁻¹·m⁻³(处理 3)，每个处理 3 个重复，共 9 个堆肥箱。

试验操作时，先在堆肥箱内放入 40 cm 左右厚度的搅拌均匀的物料，然后将死猪放入(每个箱体所放置死猪的重量尽量相同)，所有死猪未经任何前处理，整体放入堆肥箱体内，之后在死猪尸体上覆盖堆肥物料至箱体放满。堆肥初始各处理死猪、猪粪和秸秆重量及其所占总混合物料的比例情况见表 2。

通风方式为间歇式通风，利用时间继电器自动控

表 1 堆肥发酵原料基本特性

Table 1 Initial properties of materials used for composting				
原料	含水率/%	全碳/%	全氮/%	C/N
猪粪	78.3±2.5	32.1±1.2	3.1±0.5	10.4
玉米秸秆	15.2±1.3	38.3±1.3	1.6±0.7	23.9
混合物料	64.0±1.7	32.9±2.8	2.2±0.1	15.0

表 2 堆肥初始各处理死猪、猪粪和秸秆质量及其所占总混合物料的比例

Table 2 Amount of dead pigs, pig manure and corn stalk used in different treatments						
处理	初始死猪		初始猪粪		初始秸秆	
	质量/kg	占总物料比例/%	质量/kg	占总物料比例/%	质量/kg	占总物料比例/%
1	58.5±0.2a	8.6±0.0a	565.1±0.0a	83.6±0.0a	52.4±0.0a	7.8±0.0a
2	58.2±0.1a	8.6±0.0a	565.1±0.0a	83.6±0.0a	52.4±0.0a	7.8±0.0a
3	57.7±0.7a	8.6±0.1a	565.1±0.0a	83.7±0.1a	52.4±0.0a	7.8±0.0a

注：同列中相同小写字母表示处理间差异性不显著，不同字母表示处理间差异性显著， $P<0.05$ ， $n=3$ 。下同。
Note: Different lower-case letters indicate significant differences at $P<0.05$ ， $n=3$. The same below.

制,风机运行 10 min 后停 20 min,如此循环。试验设计根据温度变化情况决定是否需要翻堆,如果箱体内堆肥温度下降比较明显,则进行翻堆,否则不翻堆。

1.4 样品采集和测试

箱体内堆肥温度和室外温度采用温湿度自动采集器(HOBO,美国 Onset)进行测定,每小时自动测定 1 次。

堆肥固体样品每隔 10 d 采集 1 次,采样时从箱体内不同位置分别取样,充分混合,以保证采样均匀。每份固体样品分为两部分保存,新鲜样品用于测定粪大肠菌群数、含水率和 pH 值等指标,另一部分风干、粉碎后过 0.5 mm 筛,测定有机质和总氮。各指标测定方法:粪大肠菌群数按 GB/T 1952.1—2004 测定,含水率、pH 值和有机质按 NY 525—2012《有机肥料》中相关标准方法测定;总氮采用杜马斯燃烧法(PE 公司,CHN 元素分析仪)测定。

为了解死猪的降解情况,试验开始、翻堆和试验结束时对死猪未分解的部分进行称重。操作方法为:翻堆和试验结束时,将全部堆料从箱体中翻出,人工筛检出未分解的死猪肌肉和骨骼,并尽量去掉粘在肌肉和骨骼上的堆料,然后称重。

1.5 死猪降解率

试验开始、翻堆和结束时对死猪剩余部分进行称重,根据以下公式计算死猪的降解率:

$$\eta = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\%$$

式中: m 为翻堆或试验结束时剩余死猪的质量,kg; m_0 为堆肥开始时死猪的质量,kg。

2 结果与讨论

2.1 死猪堆肥过程温度的变化

温度是反映堆肥物料有机物降解状况的重要指标^[17],试验期间不同处理的堆体中心温度变化如图 2 所示。发酵开始后第 3 d 各处理温度几乎相同,均达到 50 ℃ 以上,第 7 d 后温度均达到 70 ℃ 以上,之后各处理温度整体表现出缓慢下降的趋势。第 32 d 翻堆时,温度在 60 ℃ 左右,翻堆后堆肥温度先是升高,然后开始下降,直到试验结束。

开始阶段不同处理的堆肥温度几乎相同,说明三种通风率都能够满足堆肥升温阶段的供氧量。高温阶段(>50 ℃)^[18],处理 1 和处理 3 温度几乎完全相同,只有处理 2 温度下降比较明显,主要是因为处理 2 有一个堆肥箱温度整体偏低,导致处理 2 温度偏差较大。

翻堆后,3 组处理的温度都迅速上升,其中处理 2 温度稍高于处理 1 和处理 3,处理 1 和处理 3 温度则差别不大。

虽然不同处理间温度有所不同,但差异不显著。根据 GB 7959—1987《粪便无害化卫生标准》,堆肥温度 50~55 ℃ 保持 5~7 d,是杀灭堆料中所含致病微生物和蛔虫卵,从而保证堆肥卫生指标合格和堆肥腐熟的必要条件。本试验中,3 个处理日平均温度超过 55 ℃ 以上的时间分别为 45、35 d 和 43 d,完全满足相关要求。因此,从温度指标分析,通风率 60~100 L·min⁻¹·m⁻³ 均能实现死猪堆肥处理的升温 and 高温腐熟过程。

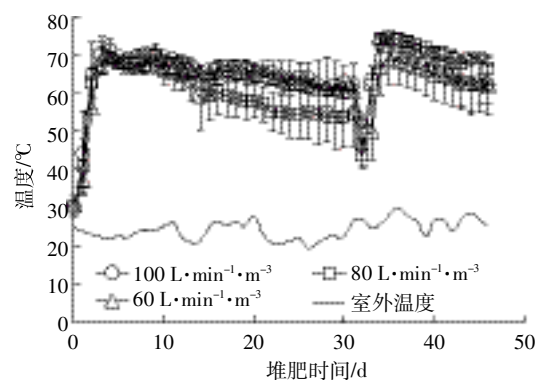


图 2 死猪堆肥过程中各处理日平均温度变化情况

Figure 2 Changes in temperature in three treatments during dead pig composting

2.2 死猪重量变化及降解率

在堆肥开始、翻堆(第 32 d)和堆肥结束(第 46 d)时分别对死猪分解剩余的尸体和骨骼进行收集和称重,并计算死猪降解率(表 3)。由表 3 可知,堆肥开始时,每个箱体内死猪质量在 57.7~58.5 kg 范围内,第 32 d 翻堆时,死猪降解率达 70.3%~70.7%;第 46 d 的堆肥试验结束时,仅剩余 2.2~3.2 kg,降解率都在 95% 左右,肌肉组织全部消失,剩余全部为骨骼。

本试验中,死猪未经任何处理、整体放入堆肥箱

表 3 各处理死猪平均质量(湿基)和降解率变化情况

Table 3 Mean weights(wet basis) of dead pigs in different treatments

处理	初始质量	第 32 d(翻堆)		第 46 d(结束)	
		质量/kg	降解率/%	质量/kg	降解率/%
1	58.5±0.2a	17.1±2.4a	70.7±4.1a	2.6±0.6a	95.6±1.1a
2	58.2±0.1a	17.2±3.2a	70.5±5.6a	3.2±1.3a	94.6±2.2a
3	57.7±0.7a	17.2±5.1a	70.3±8.6a	2.2±0.9a	96.2±1.5a

体内,由于死猪个体的差异,3组处理间死猪质量不能完全相等,但无显著差异;在第32 d时处理1降解率稍高,处理3的降解率最低,但差异不显著;堆肥结束时,处理3的降解率最高,为96.2%,处理2的降解率最低,为94.6%,统计分析认为3组间差异不显著。因此,从死猪降解率分析,不同通风率处理组间无显著性差异。

关于好氧堆肥通风率,不同原料差别较大,范围在 $50\sim 500\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 都见诸报道^[4,19-21],郭东坡等发现通风率不大于 $100\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 是死猪无害化处理的较优选择^[5]。本试验结果证明,通风率低至 $60\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$,死猪降解率仍达到96.2%。由于高湿、高温的环境条件有利于动物尸体的降解,在能够满足堆肥物料好氧微生物需氧量的条件下,适当选择相对较低的通风率可能更加有利于动物尸体的降解,但低于 $60\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的通风率对死猪堆肥处理是否合适还有待进一步试验。

在死猪堆肥处理的过程中,死猪的表皮更加难以分解^[5],因此堆肥开始后1~2周内,虽然发酵温度能达到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,但主要是死猪表皮的降解过程,肌肉组织降解相对较慢,骨骼和肌肉则呈现分离的状态;发酵进行3~4周时,嗜热微生物比较活跃,死猪肌肉和内脏组织等有机物大量降解,第32 d翻堆时发现大部分肌肉组织已经完全降解,主要残余物为骨骼以及部分软组织,此阶段箱体内产生大量的热量,水分蒸发迅速,因而应在第4周末翻堆并补充水分,以提高微生物的活性,保证堆肥的继续进行;在第46 d试验结束时,肌肉组织全部消失,仅仅剩余少量骨骼,而且骨骼已经呈现出酥脆状态,箱体内发酵产品完全可以作为肥料使用。

2.3 粪大肠菌群的杀灭情况

大肠菌群数曾在堆肥成品中被高频率的检出^[22],为此,本试验对粪大肠菌群数进行了检测。分别对堆肥开始时的死猪肠道样品和猪粪秸秆混合物,以及第10 d和第46 d(堆肥结束)的堆肥混合物进行取样,测定其中粪大肠菌群数,结果见表4。虽然堆肥开始前死猪和猪粪中都含有大肠菌群,但本试验的持续高温能够将其有效杀灭,完全满足相关标准的无害化要求,说明死猪堆肥处理法具有生物安全性。

2.4 堆肥物料的变化

试验过程对样品的含水率、pH值、有机质和全氮含量进行了测定(图3)。

堆肥开始后,温度迅速上升,带走大量水分,含水

表4 试验堆肥中粪大肠菌群数的变化

Table 4 Population of fecal coliform in dead pigs and composting mixture

堆肥时间	粪大肠菌群数(MPN·g ⁻¹)	
	平均值	标准偏差
0 d(死猪)	780	320
0 d(猪粪)	940	277
10 d(堆肥混合物)	538	400
46 d(堆肥混合物)	3	0

率明显下降,第32 d翻堆时处理1的含水率降至38.4%,处理2的含水率为35.7%,处理3的含水率为52.5%。处理1下降幅度最大,处理3最小,说明含水率受通风率影响非常明显。为保证堆肥继续进行,翻堆时对物料补充水分,试验结束时,处理1含水率为38.2%,处理2含水率为44.3%,处理3含水率为55.2%,差别依然明显(图3a)。微生物生长适宜的含水率在50%~60%,但NY 525—2012《有机肥料》中对有机肥产品含水率要求小于30%。因此,堆肥初期可以适当降低通风率,以保证微生物生长所需水分,到堆肥后期猪尸体基本分解完,可以适当提高通风率,以降低堆肥产品的含水率。

3组处理的pH值在试验过程中变化情况几乎相同,开始时堆肥物料的pH值为7.2左右,10 d后均升高至8.5左右,之后基本保持在8.0~8.5范围内,堆肥结束时pH值均为8.4(图3b),变化规律同普通堆肥pH值变化相同^[16-17]。堆肥产品pH值满足NY 525—2012《有机肥料》的要求。

堆肥过程中微生物将有机物分解为二氧化碳、水以及其他碳水化合物。堆肥开始阶段,易降解有机物质如简单碳水化合物和脂肪等被微生物分解,有机质含量下降;发酵后期,部分难降解的有机质开始逐渐分解,但是速率相对较低,同时死猪降解后的部分有机物进入堆肥,有机质含量又有小幅升高(图3c)。堆肥结束时,3组处理有机质含量(干基)分别为45.5%、49.0%和51.1%,说明有机质含量受通风率影响,通风率高,有机物分解更加彻底。

全氮是堆肥养分的重要指标之一,堆肥初始阶段,氨氮大量的挥发,导致堆肥全氮含量有所降低,随着堆肥的进行,氮含量(干基)有所升高,堆肥结束时,3组处理的含氮量分别为2.9%、2.2%和2.3%。这是由于干物质的下降幅度超过全氮下降幅度,导致全氮相对含量增加^[16],也可能是由于死猪分解后部分氮元素进入堆肥后造成的^[5]。

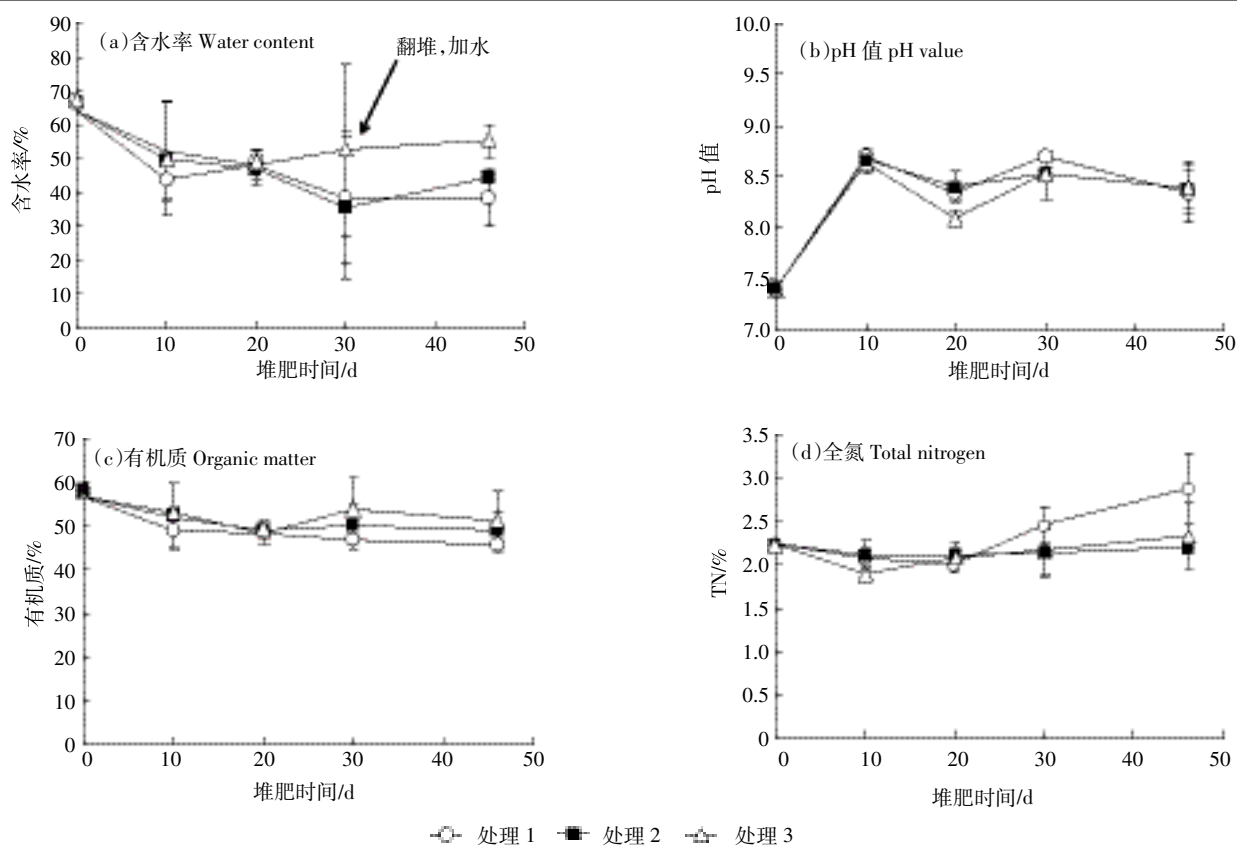


图3 堆肥物料特性参数的变化情况

Figure 3 Changes in some properties of composting mixture over time

对堆肥过程的物料特性分析可知,堆肥结束时物料的粪大肠菌群数为 $3 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$, pH 值为 8.3~8.4, 有机质含量(干基)为 45.5%~51.1%,均满足 NY 525—2012《有机肥料》中相关技术指标的要求。

3 结论

(1)利用堆肥法处理死猪,利用 0.95 m^3 的猪粪和秸秆混合物料处理质量为 57.7~58.5 kg 的死猪,经 46 d 的发酵,3 组处理的死猪降解率(湿重)分别为 $(95.6 \pm 1.1)\%$ 、 $(94.6 \pm 2.2)\%$ 和 $(96.2 \pm 1.5)\%$,不同处理间无显著性差异。

(2)所有处理堆体日平均温度高于 55°C 的时间均超过 35 d,堆肥 46 d 后物料中粪大肠菌群数为 $3 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$,满足粪便无害化标准的相关要求。

(3)通风率在 $60 \sim 100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的条件下,通风率对死猪降解率无显著影响;堆肥结束后,物料的 pH 值为 8.3~8.4,有机质含量(干基)为 45.5%~51.1%,均满足 NY 525—2012《有机肥料》中相关技术指标的要求。在死猪堆肥处理的实际应用中,选择 $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的通风率为宜。

参考文献:

- [1] 沈玉君,赵立欣,孟海波.我国病死畜禽无害化处理现状与对策建议[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6):167-173.
SHEN Yu-jun, ZHAO Li-xin, MENG Hai-bo. Present status of harmless disposal of dead livestock and poultry in China and counter-measures[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(6):167-173
- [2] 农业部. 建立病死猪无害化处理长效机制试点方案[EB]. 北京, 2013. http://www.moa.gov.cn/govpublic/SYJ/201309/t20130930_3621479.htm.
- [3] Kalbasi A, Mukhtar S, Hawkins S E, et al. Design, utilization, biosecurity, environmental and economic considerations of carcass composting[J]. *Compost Science and Utilization*, 2006, 14(2):90-102.
- [4] 习佳林,董红敏,贺爱国,等. 不同通风条件下堆肥处理死鸡效果研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5):1314-1320.
XI Jia-lin, DONG Hong-min, HE Ai-guo, et al. The effect of different ventilation rates on composting of dead hens[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5):1314-1320.
- [5] 郭东坡,陶秀萍,尚 斌,等. 死猪堆肥处理的通风率选择探讨[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5):187-193.
GUO Dong-po, TAO Xiu-ping, SHANG Bin, et al. Selection of ventilation rates on dead pig composting[J]. *Transactions of the Chinese Society*

- of *Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 187–193.
- [6] Stanford K, Hao X, Xu S, et al. Effects of age of cattle, turning technology and compost environment on disappearance of bone from mortality compost[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(19): 4417–4422.
- [7] Keener H M, Elwell D L, Monnin M J. Procedures and equations for sizing of structures and windrows for composting animal mortalities[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000, 16(6): 681–692.
- [8] Fonstad T A, Meier D E, Ingram L J, et al. Evaluation and demonstration of composting as an option for dead animal management in Saskatchewan[J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2003, 45: 6. 19–6. 25.
- [9] Kalbasi A, Mukhtar S, Hawkins S E, et al. Carcass composting for management of farm mortalities; A review[J]. *Compost Science and Utilization*, 2005, 13(3): 180–193.
- [10] Keener H M, Elwell D L. Dead animal composting[R]. Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering, Ohio Agricultural Research and Development Center, the Ohio State University. II. C keen-er presentation, 2006.
- [11] Murray D, Meidinger R G, Golovan S P, et al. Transgene and mitochondrial DNA are indicators of efficient composting of transgenic pig carcasses[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(9): 1795–1804.
- [12] Berge A C B, 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.
- [13] Gwyther C L, Williams A P, Golyshin P N, et al. The environmental and biosecurity characteristics of livestock carcass disposal methods; A review[J]. *Waste Management*, 2011, 31(4): 767–778.
- [14] Bernal M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5444–5453.
- [15] Ahn H K, Richard T L, Glanville T D. Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials[J]. *Waste Management*, 2007, 28(8): 1411–1416.
- [16] 徐卫平. 染疫动物生物安全静态堆肥法的建立与评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- XU Wei-ping. Development and evaluation of biosecure static com-
posting systems for disposal of infectious livestock mortalities [D].
Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [17] 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 com-
posting with different aeration rates on maturity variation and emission
of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010,
29(9): 1814–1819.
- [18] 罗一鸣, 李国学, Frank 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 NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during pig manure
composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural En-
gineering*, 2012, 28(22): 235–242.
- [19] 焦洪超, 张洪芳, 奕炳志, 等. 不同通风量对猪粪好氧堆肥效果的影
响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 173–177.
- JIAO Hong-chao, ZHANG Hong-fang, LUAN Bing-zhi, et al. Effects
of ventilation on aerobic composting of swine feces[J]. *Transactions of
the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 173–177.
- [20] 张相锋, 王洪涛, 聂永丰. 通风量对蔬菜和花卉废弃物混合堆肥的
影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 134–137.
- ZHANG Xiang-feng, WANG Hong-tao, NIE Yong-feng. Effect of ven-
tilation rate on vegetable waste and flower straw co-composting[J].
Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,
21(10): 134–137.
- [21] 李 季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 二版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- LI Ji, PENG Sheng-ping. The practical handbook of compost engineer-
ing [M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [22] 龚春明, 王晓丹, 顾卫兵, 等. 堆肥中大肠菌群等粪便污染指标菌的
残留状况调查[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1595–1600.
- GONG Chun-ming, WANG Xiao-dan, GU Wei-bing, et al. Investiga-
tion on survival of coliform bacteria in various composts[J]. *Journal of
Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1595–1600.