

80 mm 以下粒径的垃圾堆肥工艺优化研究

魏洪飞¹ 李国学^{2*} 张红玉² 高丹² 史殿龙²

(1. 吉林农业大学 资源与环境学院, 长春 130118; 2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 以北京市南宫堆肥厂现有堆肥工艺为对照,研究了添加倒仓破碎工艺和缩短堆肥周期对 0~80 mm 粒径生活垃圾堆肥腐熟度的影响,并在此基础上采用模糊数学法对新工艺的可行性进行了分析。试验以马家楼转运站经筛分的 0~80 mm 粒径垃圾为堆肥原料,共设 3 个处理。处理 1 为高温发酵 8 d(中间倒仓破碎 1 次)→后熟化 12 d→最终熟化 12 d,堆肥时间共 32 d;处理 2 为高温发酵 7 d(中间倒仓破碎 1 次)→后熟化 12 d→最终熟化 12 d,堆肥时间共 31 d;对照(CK)为高温发酵 8 d(不倒仓破碎)→后熟化 12 d→最终熟化 12 d,堆肥时间共 32 d。结果表明:与对照相比,处理 1 的评价级别最高,即增加倒仓破碎工艺可以促进堆肥的腐熟度,处理 2 的腐熟度与处理 1 相差较小,即在倒仓破碎的工艺基础上,缩短堆肥周期具有一定的可行性。

关键词 生活垃圾; 堆肥; 倒仓破碎; 腐熟度; 模糊数学

中图分类号 X 705

文章编号 1007-4333(2011)04-0080-08

文献标志码 A

Process study of municipal solid waste composting with particle <80 mm

WEI Hong-fei¹, LI Guo-xue^{2*}, ZHANG Hong-yu², GAO Dan², SHI Dian-long²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract This paper aims to study the compost maturity influenced by pile-turning and crushing and shortening composting periods, and then analyze the feasibility of these new processes by fuzzy mathematics, based on the existing processing mode of Nangong Compost Plant in Beijing. The experiment was conducted with composting materials 0–80 mm MSW screened out from Majialou transfer station, and designed as three treatments: T1: 8 days of high temperature fermentation followed by 12 days of post-ripening fermentation and 12 days of terminal-ripening fermentation, turning and crushing once, 32 days in total; T2: 7 days of high temperature fermentation followed by 12 days of post-ripening fermentation and 12 days of terminal-ripening fermentation, turning and crushing once, 31 days in total; CK: 8 days of high temperature fermentation followed by 12 days of post-ripening fermentation and 12 days of terminal-ripening fermentation, no turning or crushing once, 32 days in total. The results show that, compared with CK, the evaluation level of T1 is the highest, which means that the technology of pile-turning and crushing can improve the maturity of compost greatly; the maturity of T1 and T2 differs little, indicating the feasibility of shortening composting period under the process of pile-turning and crushing.

Key words municipal solid waste; composting; pile-turning and crushing; maturity; fuzzy mathematics

堆肥化处理作为生活垃圾减量化和资源化的一个重要手段,越来越为各国重视。早在 20 世纪的 70~80 年代,许多发达国家曾建设了大批机械化程

度较高的垃圾堆肥厂,有效地推动了垃圾堆肥技术的推广应用。我国城市生活垃圾处理起步于 80 年代后期,由于采用混合垃圾收集方法,增加了物料的

收稿日期: 2010-09-04

基金项目: 国家科技部重大水专项 (2008ZX807209-03-3)

第一作者: 魏洪飞, 硕士研究生, E-mail: weihongfeicc@163.com

通讯作者: 李国学, 教授, 主要从事固体废弃物处理与资源化研究, E-mail: ligx@cau.edu.cn

复杂性,严重地阻碍了堆肥生产的规模化发展,同时存在堆肥周期长,占地面积大等缺点^[1]。近年来,随着人口的日益增长和生活水平的不断提高,城市生活垃圾的产生量不仅显著增大,同时其组成也发生了较大的变化,可生物降解的有机组分约占60%。2009年,北京市生活垃圾产生量669万t^[2],但焚烧、生化处理和卫生填埋比例仅为2:8:90,垃圾处理结构极不合理。预测表明,2015年全市生活垃圾产生量将达到1095万t^[3],为了促进生活垃圾减量化、资源化和无害化,北京市政府制定了2015年生活垃圾处理总体战略目标,在增加处理能力的基础上,将生活垃圾处理结构中的焚烧:堆肥:填埋调整为4:3:3。

南宫垃圾堆肥厂是北京市最大生活垃圾处理设施,主要处理从马家楼转运站筛分后的中粒径(15~80 mm)垃圾。近年来,由于生活垃圾中可堆腐物含量不断增加,15 mm筛下物中可堆腐物含量也达到了40%~60%,并且经试验证明其具有可堆肥性^[4],为0~80 mm直接堆肥提供了可能。直接堆肥可以大大减少原生垃圾填埋数量,实现节省土地,减少渗滤液产生的目的。目前国内外在缩短堆肥发酵周期方面的研究多倾向于添加菌剂和倒仓、破碎处理^[5],尤其是在高温发酵阶段效果会更明显。陈同斌和Kelleher等人均认为在此阶段进行倒仓可促进物料与空气接触,有利于增强好氧发酵堆体中微生物的活力,从而提高堆肥效率和堆肥质量^[6-7]。

本研究以0~80 mm粒径段的生活垃圾为原料,在北京南宫堆肥厂隧道发酵仓内进行高温堆肥试验,并以高温发酵周期8 d为对照,研究增加破碎工艺将高温周期减少到7 d的可能性,为优化南宫堆肥厂的堆肥工艺提供技术参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2008-05-14—05-22在南宫堆肥厂进行。供试垃圾采自马家楼分选转运站。源于北京市宣武区和丰台区的生活垃圾经马家楼转运站80 mm筛分后,取0~80 mm部分作为堆肥原料,转运到南宫堆肥厂进行堆肥处理。

1.2 试验方法

本实验在长27 m,高度和宽度均为4 m的隧道发酵仓中进行,共设以下3个处理:

对照:高温发酵8 d→后熟化12 d→最终熟化

12 d,堆肥时间共32 d,形成堆肥产品;

处理1:高温发酵8 d(中间倒仓破碎1次)→后熟化12 d→最终熟化12 d,堆肥时间共32 d,形成堆肥产品;

处理2:高温发酵7 d(中间倒仓破碎1次)→后熟化12 d→最终熟化12 d,堆肥时间共31 d,形成堆肥产品。

在堆肥前、高温发酵结束、后熟化结束以及最终熟化结束等时间节点,分别采集堆肥样品,每个垃圾堆体沿着长度方向设3~5个采样点,每个采样点取样2 kg,混合均匀后再用四分法取样2 kg以备测试。测定样品的温度、含水率、体积质量、pH、EC值、腐殖酸光学特性(E_4/E_6)、水溶性碳(WSC)质量分数、 NH_4^+-N 质量分数、发芽率指数(I_G),固相样品的C/N和粪大肠菌值等指标,指标值取各采样点样品测定结果的平均值。

1.3 测定指标与测定方法

1.3.1 垃圾样品物理学指标的测定

温度:由南宫堆肥厂高温发酵仓内温度自动监控系统测得。

含水率:将垃圾在105~110 °C烘后按下式计算

$$W_i\% = (M - M_f) / M \times 100\%$$

式中: W_i 为垃圾含水率,%; M_f 为垃圾干重,kg; M 为样品总重量,kg。

容重:垃圾体积质量的计算公式为

$$B_i = M_i / V_i$$

式中: B_i 为垃圾体积质量,kg/m³; M_i 为垃圾湿基质量,kg; V_i 为垃圾的体积,m³。

1.3.2 垃圾样品化学指标的测定

水溶性指标:将垃圾按质量浓度为1:10(g/mL)浸提过滤。用twin pH B-212测pH;电导率 λ_{EC} 用DDS-11A型电导测定仪测定; E_4/E_6 用722型可见光分光光度计于465和665 nm处分别测定吸光度值并取两者之比;用重铬酸钾氧化法测定水溶性碳(WSC);铵态氮(NH_4^+-N)用凯氏定氮法测定。

固相指标:将垃圾彻底风干后,用植物粉碎机粉碎并过0.149 mm筛。总有机碳(TOC)采用重铬酸容量法—外加加热法;总氮(TN)采用凯氏定氮法;固相C/N=总有机碳/总氮。

1.3.3 垃圾样品生物学指标的测定

I_G :将垃圾样品按质量浓度为1:10(g/mL)浸

提过滤,取 5 mL 浸提液于铺有滤纸的 9 cm 培养皿内,播 20 粒饱满的小青菜种子,放置 20 °C 培养箱中培养,第 48 h 测种子发芽率 I_G :

$$I_G/\% = (\text{堆肥浸提液培养种子发芽率} \times \text{根长}) / (\text{对照种子发芽率} \times \text{根长}) \times 100$$

粪大肠菌值:多管发酵法。

1.4 利用模糊数学对腐熟度的评价

模糊评价的原理与方法^[8]

1.4.1 确定模糊评价因子

在堆肥腐熟度指标中选取具有代表性和实际意义的几个指标。

1.4.2 隶属度函数模型

本文采用隶属度函数为:

$$r_1(c_i) = \begin{cases} 1 & 0 \leq c_i \leq s_1 \\ (s_2 - c_i)/(s_2 - s_1) & s_1 < c_i < s_2 \\ 0 & c_i \geq s_2 \end{cases}$$

$$r_2(c_i) = \begin{cases} 0 & c_i \leq s_1, c_i \geq s_3 \\ (c_i - s_1)/(s_2 - s_1) & s_1 < c_i \leq s_2 \\ (s_3 - c_i)/(s_3 - s_2) & s_2 < c_i < s_3 \end{cases}$$

$$r_3(c_i) = \begin{cases} 0 & c_i \leq s_2, c_i \geq s_4 \\ (c_i - s_2)/(s_3 - s_2) & s_2 < c_i \leq s_3 \\ (s_4 - c_i)/(s_4 - s_3) & s_3 < c_i < s_4 \end{cases}$$

$$r_4(c_i) = \begin{cases} 0 & c_i \leq s_3 \\ (c_i - s_3)/(s_4 - s_3) & s_3 < c_i \leq s_4 \\ 1 & c_i > s_4 \end{cases}$$

式中: $r_1 \sim r_4$ 为各评价因子不同等级隶属度值; c_i 为各评价因子实测值; s_i 为各评价因子不同等级分级指标值。

1.4.3 评价因子权重

本研究运用的权重计算式为

$$\omega_i = \frac{c_i}{s_i} / \sum_{i=1}^m \frac{c_i}{s_i}$$

式中: ω_i 为第 i 种评价因子的权重; c_i 为第 i 种评价因子实测值; s_i 为第 i 种评价因子分级标准平均值; m 为评价因子个数。计算出各因子权重后,组成权重模糊矩阵 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ 。式中: m 为评价因子个数,将各项评价因子实测值代入相应的隶属函数, m 个评价因子隶属于 n 个不同级别的隶属度组成隶属度矩阵 R (R 为 $m \times n$ 阶), $m=5, n=4$ 。

1.4.4 模糊评价结果

将隶属度矩阵 R 与权重矩阵 W 进行模糊复合

运算,得出评价结果。

2 结果与分析

2.1 物理学指标

2.1.1 高温发酵过程中堆体温度的变化

在堆肥过程中,堆体温度在 50~55 °C 条件下保持 5~7 d 是杀灭堆料所含致病微生物和害虫卵,保证堆肥卫生合格和堆肥腐熟的重要条件^[9]。

由图 1 可以看出,对照(高温发酵 8 d),即不倒仓破碎的情况下,堆体在密闭发酵仓内发酵 2 d 之后,温度就可达 55 °C 以上,并可在此高温持续 5 d 以上。处理 1(高温发酵 8 d)和处理 2(高温发酵 7 d)的垃圾在整个高温发酵阶段之间温度的变化几乎没有差异,并且堆体在倒仓破碎 1 次后温度骤降,但不到 1 d,堆体温度又恢复到 55 °C 以上,在此后的时间里,温度一直居高不下。8 d 高温发酵能连续 5 d 的保持温度在 55 °C 以上,但 7 d 发酵只能连续 4 d 保持 55 °C 以上高温。因此,对于缩短高温发酵时间为 7 d 的方案,需要进一步从其它腐熟度指标变化进行可行性验证。

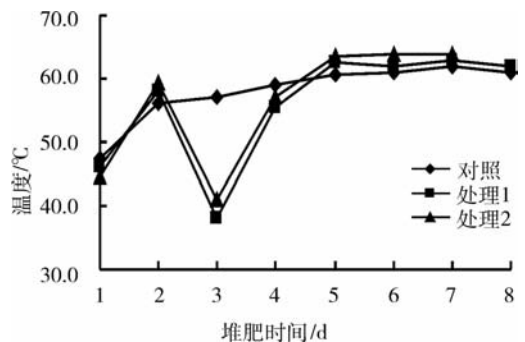


图 1 高温发酵过程中温度变化

Fig. 1 Changes of temperature in the compost during high-temperature fermentation

2.1.2 含水率变化

在堆肥过程中,水分为微生物生长所必需条件之一。一般含水率为质量计的 50%~60% 时,最有利于微生物分解有机物^[10]。由图 2 可以看出,3 种堆肥处理方式原垃圾的含水率都符合微生物分解有机物的最佳范围。随着堆肥的进行,含水率均呈递减的趋势,主要是因为发酵时放出的热量带出大量水分,使得最终堆肥产品的含水率都明显下降。处理 2 在高温发酵阶段含水率升高,很有可能是顶部喷洒渗滤液过多所致。3 种堆肥处理在堆肥结束

时,对照产品含水率最低,处理 1 产品次之,处理 2 产品的含水率最高。

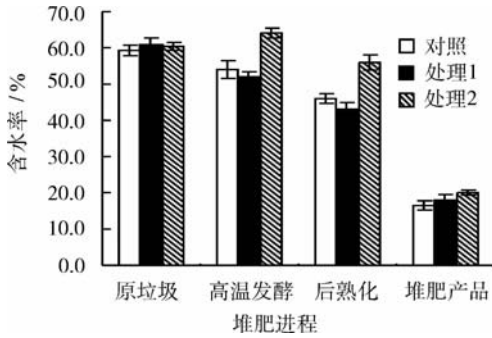


图 2 堆肥过程中含水率的变化

Fig. 2 Change of moisture in the composting process

2.1.3 容重

由图 3 可以看出,3 种堆肥处理方式各个阶段的容重都呈递增的趋势。产生这种现象的原因是随着堆肥的进行,原垃圾中大量固态有机物不断被微生物分解转化,大分子有机物分解为比较简单、稳定的小分子物质(CO₂、水蒸气等),从而使得垃圾堆体的体积不断减小,从而容重不断增大。处理 1 和处理 2 两种处理方式最终堆肥产品的容重几乎相等。并且比对照的大,这是由于破碎作用使得物料粒径更均匀、物料的密实度更大。3 种最终产品的容重基本保持在 400~450 kg/m³之间。

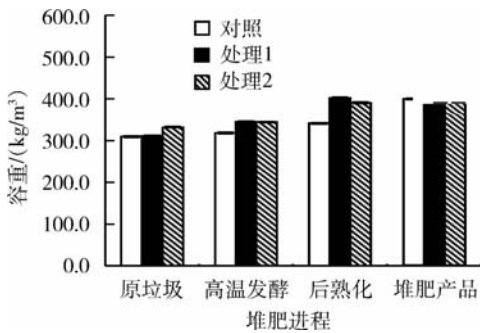


图 3 堆肥过程中容重的变化

Fig. 3 Change of bulk density in the composting process

2.2 化学指标

2.2.1 堆肥过程中 pH 变化

pH 是影响微生物生长的重要因素之一。微生物生长繁殖最适宜的 pH 是中性或弱碱性,腐熟堆肥一般也为中性或弱碱性^[11]。由图 4 可以看出,不同高温发酵周期, pH 的总体变化均呈上升趋势。这是因为堆肥开始时,由于有机物分解产生的

有机酸使 pH 下降;随着堆肥的继续进行,温度升高使堆体中的乙酸、丁酸挥发后者降解,含 N 的有机物分解释放出铵,使堆体 pH 上升^[12]。3 种堆肥处理方式原垃圾的 pH 相差不大,均为 4.0~4.5,呈弱酸性。但随着堆肥的进行,垃圾堆体的 pH 迅速上升。其中,处理 1 最终堆肥产品的 pH 达到 7.5,符合腐熟堆肥呈弱碱性的标准;对照和处理 2 堆肥产品的 pH 较小,分别为 6.6 和 6.4。一般 pH 易受堆肥原料和堆肥条件的影响,按照城镇垃圾农用控制标准和中华人民共和国农业行业标准商品有机肥料中对 pH 的规定,3 种堆肥处理最终堆肥产品均达到了标准。

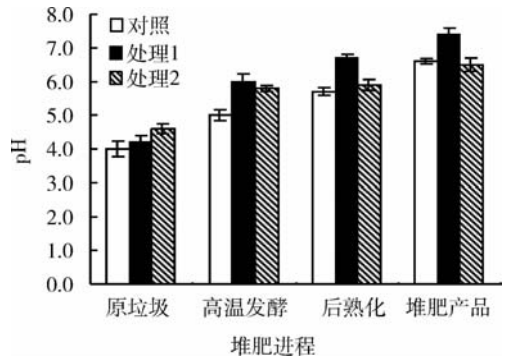


图 4 堆肥过程中 pH 的变化

Fig. 4 Change of pH in the composting process

2.2.2 堆肥过程中电导率(λ_{EC})的变化

电导率(λ_{EC})反映了堆肥溶液中的离子浓度,即可溶性盐的含量。当电导率超过 4 mS/cm 时,这种堆肥施入土壤就会抑制作物的生长^[13],所以常将电导率作为衡量垃圾堆肥腐熟度的有效指标之一。

由图 5 可以看出,对于 3 种处理方式,EC 值的变化趋势基本上是一致的,都在逐渐下降。随着堆肥的进行,由于 CO₂、NH₃ 的挥发,以及胡敏酸物质

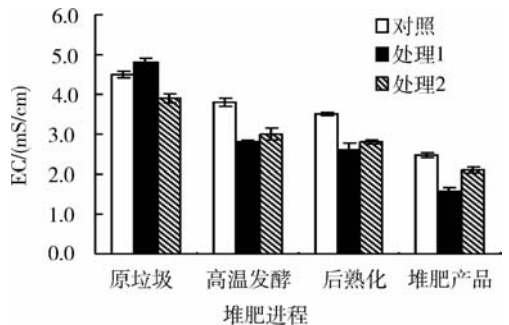


图 5 堆肥过程中电导率的变化

Fig. 5 Change of EC in the composting process

含量的升高和阳离子交换量的升高,从而使得电导率值下降。3种堆肥处理方式经过最终熟化所形成的堆肥产品的电导率值均降到4 mS/cm以下。其产品施用于土壤后,基本不会对作物的生长产生毒害,按电导率的指标衡量,最终垃圾堆肥产品均达到了腐熟。其中处理1、处理2堆肥产品中的可溶性盐的含量比对照低,说明倒仓破碎有利于降低堆肥的电导率值,堆肥产品腐熟的更好。

2.2.3 垃圾堆肥过程中垃圾堆肥水浸提液 E_4/E_6 的变化

在堆肥水浸提液中, E_4/E_6 通常随腐殖酸分子量的增加或缩合度增大而增大,因此 E_4/E_6 可以用来作为堆肥腐殖化作用大小的重要指标^[14]。从图6可见,3种处理方式垃圾堆肥过程中水浸提液的 E_4/E_6 比值随着堆肥过程的进行,总体呈上升的趋势,这就说明了随着堆肥进行堆体的生物化学过程比较强烈,堆肥过程在不断形成更大分子量的腐殖酸。3种堆肥处理方式垃圾堆肥的 E_4/E_6 值均高于原垃圾的 E_4/E_6 值,按 E_4/E_6 的指标衡量,3种处理方式的垃圾堆肥产品都达到了腐熟。

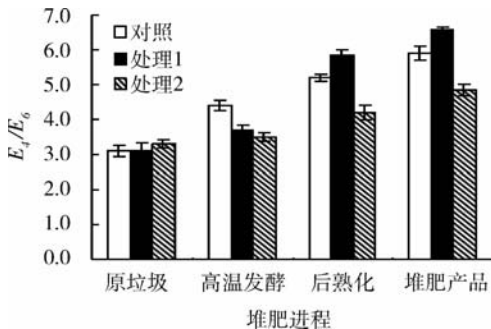


图6 堆肥过程中水浸提液的 E_4/E_6 比值的变化

Fig. 6 Change of E_4/E_6 in the composting process

2.2.4 垃圾堆肥过程中水溶性碳(WSC)的变化

水溶性碳含量(WSC)是指示堆肥稳定程度的一个合适的参数。Sharon等人认为4 g/kg为临界值,当WSC值低于该临界值时,垃圾基本腐熟^[15]。从图7中可以看出,在堆肥过程中,堆肥水浸提液WSC值均呈下降趋势并趋于稳定,3种堆肥处理方式最终的WSC值都下降到4 g/kg以下,表明堆肥均达到了腐熟。这主要是由于微生物不断分解垃圾中的小分子有机物,并进行自身繁殖,使得从堆肥开始到高温期下降幅度最大,在高温期以后,堆肥中的WSC值随着小分子有机酸逐渐被分解,WSC值下

降趋势减小。处理1和处理2的WSC值都显著低于对照,说明破碎更有利于堆肥产品的腐熟。

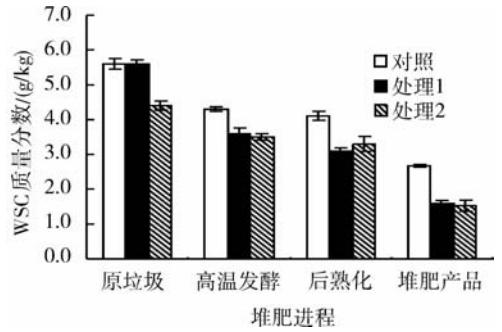


图7 垃圾堆肥过程中水溶性碳(WSC)的变化

Fig. 7 Change of WSC in the composting process

2.2.5 垃圾堆肥过程中水溶性铵态氮(NH_4^+-N)的变化

堆肥过程虽然是有机的生物降解过程,但也伴随着明显的硝化反应过程^[16]。含氮有机物发生降解产生铵。释放的氨气或被微生物同化吸收,或由固氮微生物氧化为亚硝酸盐或硝酸盐,或是逸入大气。

由图8可以看出,3种堆肥处理方式原垃圾中水溶性铵态氮(NH_4^+-N)的含量都很低,但在高温发酵阶段,水溶性铵态氮(NH_4^+-N)的含量达到最大,随后由于 NH_3 的挥发和微生物的固定作用,使得 NH_4^+-N 不断转化为 NO_3^--N , NH_4^+-N 的含量不断下降。

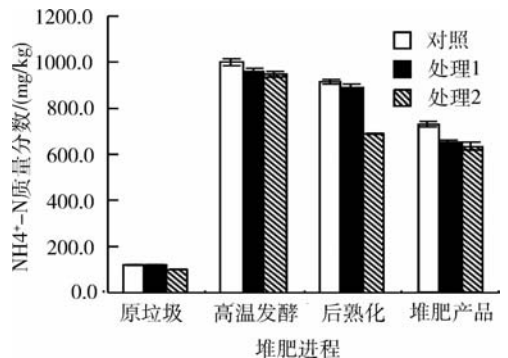


图8 垃圾堆肥过程中水溶性铵态氮(NH_4^+-N)的变化

Fig. 8 The change of NH_4^+-N in the composting process

2.2.6 垃圾堆肥过程中固相C/N的变化

C/N比是影响堆肥发酵时间、堆肥温度以及堆肥产品品质的重要因素之一,C和N的量必须维持

在一定的范围内。因此 C/N 常被作为评价腐熟度的一个经典参数^[17]，一般 C/N 从最初的 25~30 或更高降低到 15~20，表示堆肥已腐熟^[18]。由图 9 可看出，在整个堆制过程中 3 种堆肥处理方式的 C/N 均呈下降趋势，这是因为随着好氧堆肥的进行，碳和氮同时在减少，而碳的损失比氮要高，因此导致体系中 C/N 比不断减少，直到微生物对有机垃圾的降解反应达到稳定为止。3 种堆肥处理方式的 C/N 都从最初的 25~30 降低到 15~20，按照 C/N 指标衡量，最终堆肥产品均已腐熟。

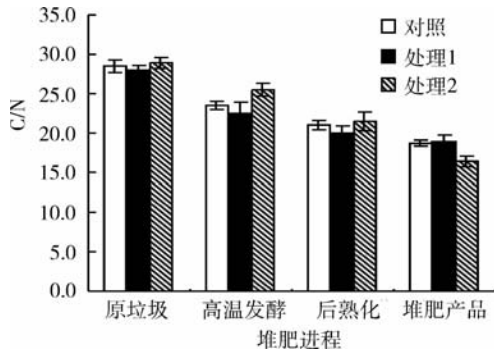


图 9 垃圾堆肥过程中固相 C/N 的变化

Fig. 9 Change of C/N in the composting process

2.3 生物学指标

2.3.1 垃圾堆肥过程中发芽率指数(I_G)的变化

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，因此发芽率指数常作为生物学指标被用来判断堆肥的腐熟度。当 I_G 大于 50% 时可认为堆肥对植物基本没有毒害作用，当 I_G 大于 80%~85% 时，即可认为该堆肥施入土壤对植物已完全没有毒性或者说堆肥已腐熟^[19]。由图 10 可见，随着堆肥时间的延长，3 种堆肥方式在高温发酵

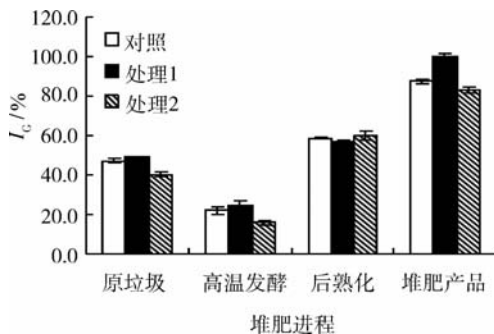


图 10 垃圾堆肥过程中发芽率指数(I_G)的变化

Fig. 10 Change of I_G in the composting process

阶段的 I_G 比原垃圾要低，这是因为高温发酵阶段产生的有机酸和铵态氮抑制种子发芽，随着堆肥的进行抑制发芽的物质以逐渐得到降解，因此在后熟化阶段以后 I_G 就呈增加趋势。3 种堆肥处理方式最终堆肥产品的 I_G 值均大于 80%，该堆肥施入土壤对植物已完全没有毒性作用。

2.3.2 垃圾堆肥过程中粪大肠菌值的变化

粪大肠菌群是一群需氧及兼性厌氧，在温度达到 55 °C 时开始死亡，并在一小时内全部死亡，在温度达到 60 °C 时，15~20 min 死亡，当温度达到 68 °C 时，立即死亡。粪大肠菌同时也是一种指示菌，当堆肥中存在大肠菌时，表明其他种类的病原菌也存在，高温致使大肠菌死亡，其他病原菌也就相应地被杀死^[3]。

由表 1 可以看出，随着堆肥时间延长，粪大肠菌值呈现上升趋势，原垃圾中粪大肠菌值的检出率几乎为 100%，而经过高温发酵阶段后基本全被杀灭，在高温阶段结束后，粪大肠菌值为 0.06~0.08，完全符合粪便无害化卫生标准^[20]规定的值 0.10~0.01。对照实验的无害化效果最好，由此说明，倒仓破碎更有利于垃圾堆肥的无害化。

表 1 堆肥过程中粪大肠菌值的变化

Table 1 Change of faecal coliforms in the composting process

堆肥进程	对照	处理 1	处理 2
原垃圾	<0.01	<0.01	<0.01
高温发酵	0.08	0.06	0.07
后熟化	1.64	1.90	1.63
堆肥产品	1.81	1.95	1.78

2.4 不同周期堆肥腐熟度程度的模糊评价

2.4.1 确定模糊评价因子

堆肥腐熟度是反映有机物降解和生物化学稳定度的指标，关于腐熟度指标的选用，目前还没有完全达成共识，主要采用化学和生物学指标进行堆肥的腐熟度判断^[21]。在各项指标中，温度、含水率及容重作为物理指标，只可作为堆肥腐熟度的参考指标。因此，本研究主要选取物理指标和化学指标相结合的方法进行评判。用 EC 变化率(%)、 E_4/E_6 变化率(%)、WSC 变化率(%)、 C/N 变化率(%)和种子发芽指数(GI)5 个指标进行综合评价。最终熟化结

束后针对每个处理,每个评价因子取其平行样本的平均值,具体值如表2所示。

表2 各评价因子值

Table 2 Values of all evaluation factors

处理	$\lambda_{EC}/\%$	E_4/E_6	WSC/ $\%$	C/N降解速率/ $\%$	$I_G/\%$
对照	54.78	5.91	47.71	34.33	87.52
处理1	32.61	6.58	28.45	32.32	99.71
处理2	53.85	4.85	34.73	43.26	83.22

2.4.2 确定评价因子等级

根据堆肥的腐熟度指标,将堆肥的腐熟度划分为4个等级:1级(腐熟)、2级(较好腐熟)、3级(基本腐熟)、4级(为腐熟),各评价因子对应的分级指标如表3所示。具体分级指标参照李春萍等人的研究结果划分^[22]。

表3 各评价因子分级指标

Table 3 Classification of compost maturity level

指标	$\lambda_{EC}/\%$	E_4/E_6	WSC/ $\%$	C/N/ $\%$	$I_G/\%$
1级	40	3	30	60	100
2级	50	5	40	30	80
3级	60	7	50	20	70
4级	70	9	60	12	50

2.4.3 模糊评价结果

将隶属度矩阵R与权重矩阵W进行模糊复合运算,3个处理模糊数学评价结果见表4。

表4 模糊评价结果

Table 4 Results of the fuzzy mathematics evaluation

处理	模糊评价矩阵	评价等级
对照	$W \cdot R = \{0.056, 0.231, 0.201, 0.201\}$	2级
处理1	$W \cdot R = \{0.289, 0.212, 0.239, 0.000\}$	1级
处理2	$W \cdot R = \{0.185, 0.254, 0.224, 0.000\}$	2级

从表4可知:3种堆肥处理方式都达到了腐熟,处理1高温发酵8d(中间倒仓破碎1次)的堆肥产品的腐熟程度最好,评价级别为1级,从模糊评价矩阵来看,优势较明显;但对照和处理2(高温发酵7d,中间倒仓破碎1次)腐熟程度也达到要求,评价级

别为2级。

3 讨论

3.1 添加倒仓破碎工艺可促进堆肥腐熟、缩短堆肥周期

堆肥进行第二天,堆体温度就达到55℃以上,倒仓破碎1次后温度骤降,但1d之内,堆体温度就恢复到55℃以上,并保持到高温堆肥结束。增加倒仓破碎工艺明显加速了堆体的升温,促进有机物的分解,这主要是倒仓破碎实现了堆体空隙CO₂气体尤其是其它臭气得到新鲜空气(主要是氧气)的置换,同时也是大颗粒的堆料变细,释放出易分解的化学组分,促进了堆肥微生物活性。与对照相比,由于添加倒仓破碎,高温阶段可以使一次发酵的时间从8d缩短为7d,进一步结合其他腐熟度指标综合分析,完成全部一次和二次发酵过程,实现最终产品腐熟的时间可缩短为31d。

3.2 可提高资源及场地的利用率并增大日处理量

1)高温发酵阶段。南宫堆肥厂现有30个隧道发酵仓,每天处理15~80mm粒径的生活垃圾600t,日进仓数为3个,每仓进料量为200t,堆高2.5m。如果采用对照和处理1的工艺运行,发酵仓的总使用数量为24个,有6个发酵仓闲置,使用率为80%。如果按照处理2的新工艺运行,由于物料在发酵仓的堆肥时间缩短为7d,在同样处理规模下,发酵仓的总使用数量为21个,使用率为70%。剩余的9个发酵仓数目高于堆肥时间7d,每天进料仓数可以增加至4个,可以实现处理规模提升到800t/d的能力,发酵仓的使用率达到93.33%,显著提高了发酵仓的利用率。

2)二次发酵阶段。二次发酵过程包括后熟化和最终熟化2个时段,后熟化时段是由敞开式的38个小区组成,小区长28m,宽4m,高度不限,最终熟化时段是由敞开式的19个小区组成,小区长30m,宽4m,高度不限。在原工艺条件下,一个发酵仓经过8d的高温堆肥后,直接出料堆制到对应的后熟化小区,总使用数量为24个,尚剩余14个,使用率仅为63.16%。经过12d后熟化并进一步经25mm筛分,筛上物直接转运到安定卫生填埋场填埋,筛下物需进一步最终熟化处理,经筛分后待最终熟化的堆体体积下降了50%,因此1个后熟化小区的堆料仅占0.5个最终熟化小区,最终熟化小区总使用数量为12个,尚余7个,使用率为63.16%。

在新工艺条件下,后熟化小区的总使用数量为 28 个,同样 25 mm 筛下物布料到最终发酵场地,最终熟化小区的总使用数量为 14 个,尚余 5 个,二次发酵场地使用率为 73.68%,也显著提高了现有二次发酵场地使用率。因此,后熟化区和最终熟化区从面积上仍能满足处理能力提升至 800 t/d 的需要。

4 结 论

1) 高温堆肥 8 d(中间倒仓破碎 1 次)堆肥产品的腐熟度优于未经过倒仓破碎堆肥,倒仓破碎有利于生活垃圾的分解和腐熟。

2) 高温发酵 8 d(中间倒仓破碎 1 次)和高温发酵 7 d(中间倒仓破碎 1 次)各腐熟度指标差异不显著,两种堆肥方式最终堆肥产品均达到腐熟。

3) 模糊评价的结果表明:3 种堆肥方式均达到腐熟,0~80 mm 粒径段生活垃圾堆肥可行。将高温发酵时间由 8 d 缩短为高温发酵 7 d(中间倒仓破碎 1 次)对于堆肥的腐熟度无影响。

4) 与原堆肥工艺相比,添加倒仓破碎工艺可缩短堆肥时间,提高发酵仓和二次发酵场地的使用率,日进发酵仓数量可由 3 个增加到 4 个,处理能力由 600 t/d 提高到 800 t/d。

参 考 文 献

- [1] 盛奎川,林福呈,阎航. 城镇生活垃圾综合处置系统及关键技术的研究进展[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2005,31(2):125-130
- [2] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队编. 北京统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2010:126-127
- [3] 王桂琴,许德刚,李国学,等. 基于不同目标的大型生活垃圾堆肥处理工艺的优选[J]. 中国环境科学,2009,29(4):402-406
- [4] 史殿龙,张志华,李国学,等. 堆高对生活垃圾中 15 mm 筛下物堆肥腐熟度的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1):324-329
- [5] 王宝良. 城市生活垃圾综合利用的新技术[J]. 科技实用技术,2005,11:43-44
- [6] 陈同斌,罗维,郑国砥,等. 翻堆对强制通风静态垛混合堆肥过程及其理化性质的影响[J]. 环境科学学报,2005,25(1):

- 117-122
- [7] Kelleher B P, Leahy J J, Henihan A M, et al. Advances in poultry litter disposal technology a review[J]. *Bioresource Technology*,2002,83:27-36
- [8] GB7959-1987. 粪便无害化卫生标准[S]. 1987
- [9] GB 8172-1987. 城镇垃圾农用控制标准[S]. 1987
- [10] Nakasaki K, Yaguchii H, Sasaki Y, et al. Effect of pH control on composting of garbage [J]. *Waste Management & Research*,1993,11:117-125
- [11] U S EPA. Compost of municipal waste water sludge[R]. Center of Enviroment Research Information Office of Research and Development;EPA 625/4- 85/014,1985
- [12] 李国学,张福锁. 堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社,2000,135-148
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:105-109
- [14] Sugahara K, Harada Y, Inoko A. Color change of city refuse during composting process[J]. *Soil Sci Plant Nutri*,1979,25:197-208
- [15] Sharon Z, Omer M, Jorge T. Dissolved organic carbon(DOC) as a parameter of compost maturity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2005,37(11):2109-2116
- [16] Bernal M P, Paredes C, Sanchez-Monedero M A, et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide of organic wastes[J]. *Bioresource Technology*,1998,63:91-99
- [17] 潘玲阳,李国学,李春萍,等. 不同粒径生活垃圾对腐熟度影响统计分析[J]. 农业工程学报,2008,24(10):209-213
- [18] Golueke C G. Principles of biological resource recovery[J]. *Biocycle*,1981,22:36-40
- [19] Riffaldi R, Levi Minzi R, Pera A, et al. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses [J]. *Waste Management and Research*,1986,4:387-396
- [20] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002:185-191
- [21] 王敦球,潘盛. 模糊综合评价法在评价堆肥腐熟度中的应用[J]. 农业环境科学学报,2005,24(增刊):212-215
- [22] 李春萍,李国学,李玉春,等. 北京市南宫隧道仓不同区间垃圾堆肥腐熟度的模糊评价[J]. 农业工程学报,2007,23(2):201-206

(责任编辑:袁文业)