

倒仓破碎对缩短发酵周期后生活垃圾堆肥腐熟度的影响

王 艳^{1,2}, 沈春红³, 李国学¹, 潘玲阳¹, 张红玉¹

(1.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2.北京垃圾渣土管理处, 北京 100067; 3.北京市工程咨询公司, 北京 100031)

摘要:为了满足日益增长的垃圾处理发展的需要,解决城市生活垃圾产生与消纳、处理之间的矛盾,以北京市南宫堆肥厂垃圾堆肥工艺和密闭隧道发酵仓为研究对象,以马家楼转运站筛分出的 15~80 mm 粒径垃圾作为堆肥原料,以 14 d 高温隧道发酵(不倒仓不破碎)→21 d 后熟化发酵→21 d 最终熟化发酵工艺为对照,以 8 d 高温隧道发酵(不倒仓不破碎)→12 d 后熟化发酵→12 d 最终熟化发酵工艺为处理 1,8 d 高温隧道发酵(第 3 d 倒仓破碎 1 次)→12 d 后熟化发酵→12 d 最终熟化发酵工艺为处理 2。通过不同发酵阶段采样和各类指标的测定,探求缩短堆肥发酵周期后倒仓破碎工艺对于生活垃圾堆肥腐熟度的影响。结果表明,处理 1 产品的腐熟度较差,处理 2 与对照处理的堆肥产品腐熟度差异不明显。将高温隧道发酵时间由 14 d 缩短为 8 d,并且第 3 d 倒仓破碎 1 次,后熟化与最终熟化时间分别由 21 d 缩短为 12 d,可以在保证堆肥产品品质的基础上显著提高堆肥效率,使南宫堆肥厂的垃圾处理能力得到大幅提高,该成果为南宫堆肥工艺优化的实施和改进及其推广应用提供了技术支持。

关键词:生活垃圾;堆肥;发酵周期;倒仓破碎;腐熟度

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)05-1053-07

The Effects of Pile Turning and Crushing on Municipal Solid Waste Compost Maturity After Shortening Composting Periods

WANG Yan^{1,2}, SHEN Chun-hong³, LI Guo-xue¹, PAN Ling-yang¹, ZHANG Hong-yu¹

(1.College of Resource and Environment Science, China Agriculture University, Beijing 100193, China; 2.Beijing Solid Waste Administration Department, Beijing 100067, China; 3. Beijing Municipal Engineering Consulting Corporation, Beijing 100031, China)

Abstract: The contradictions between production and treatment of Municipal Solid Waste (MSW) have been outstanding in China, due to the continually increasing amount of MSW being generated and the limited capacity of waste treatment facilities. Aimed at evaluating the influence of shorting composting period and changing tunnels composting technique on compost maturity, based on the Beijing Nangong composting plant case, this study used composting materials 15~80 mm MSW screened out from Majialou transfer station, and compared three different fermentation techniques: (1) Control, 14 days of high temperature fermentation followed by 21 days of post-ripening fermentation and 21 days of terminal-ripening fermentation, no turning or crushing; (2) Run 1, 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; and (3) Run 2, 8 days of high temperature fermentation followed by 12 days of post-ripening fermentation and 12 days of terminal-ripening fermentation, turning and crushing on the 3rd day. During composting process, samples were taken and maturity indexes were analyzed, the results showed that the compost from Run 1 was mature though its quality was the worst among these three fermentation techniques, while the difference between the composts from Control and Run 2 was not significant. It suggested that the fermentation technique of decreasing fermentation period with turning and crushing not only could improve the composting efficiency, but also would not reduce the quality of compost, which could provide technical support for applying, improving and popularizing the optimized composting technique of Nangong composting plant.

Keywords: municipal solid waste (MSW); compost; period of fermentation; pile-turning and crushing; maturity

近年来,由于城市人口增加、人们生活水平迅速

提高,城市生活垃圾产量日益剧增,已对很多城市造成压力,使得垃圾处理设施超负荷运行,不仅加速了处理设备的损耗、缩短了使用寿命,还容易造成二次污染和埋下安全隐患^[1-3]。生活垃圾处理处置的方法主要有堆肥、焚烧和卫生填埋,其中,由于堆肥产品施入土壤,有改善土壤理化性质、提高肥力的良好作用,因

收稿日期:2008-04-25

基金项目:北京市环卫集团二清分公司,北京市市政管委和北京市人民政府顾问团:北京市绿色奥运城市垃圾污染控制战略研究

作者简介:王 艳,女,硕士生,研究方向为废弃物处理与资源化。

通讯作者:李国学 E-mail:ligx@cau.edu.cn

此在城市生活垃圾处理方面一直备受青睐^[4]。南宫堆肥厂是 1998 年由德国投资建成运行的北京市最大的城市生活垃圾堆肥厂,设计工艺流程大致为:15~80 mm 垃圾原料→14 d 密闭隧道高温发酵→21 d 后熟化发酵→21 d 最终熟化发酵→堆肥产品,日处理垃圾 400 t^[5]。但是自 2006 年北京市实施南部生活垃圾分流方案以来,迫切需要南宫堆肥厂垃圾日处理量增至 600 t^[6]。因此在增加垃圾处理量并保证堆肥产品品质的条件下,优化改进堆肥工艺,缩短堆肥发酵周期以提高堆肥效率是非常必要的。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^[7]和倒仓处理^[8],尤其是在高温发酵阶段,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^[9-10];对于堆肥物料的粒径,国内外也有不少看法和研究结果:Agnew 和 Elwell 一致认为生活垃圾粒径的大小影响到堆体容积密度及其紧实程度,从而影响到堆肥过程^[11-12],Hogland 也认为堆肥过程中对物料进行破碎能够增大表面积有利于微生物活动,促进物料腐熟^[13]。李国学等人通过研究得出不同物料堆肥时适宜的粒径不尽相同,城市生活垃圾堆肥时较适宜的粒径范围为 20~60 mm^[14]。

本试验以南宫堆肥厂隧道发酵仓为技术依托,通过对不同发酵阶段跟踪采样,并进行腐熟度指标的测定及分析,了解缩短堆肥发酵周期以及添加倒仓破碎工艺前后生活垃圾堆肥腐熟度的变化,以探讨其对堆肥工艺优化改进的可行性,从而为最终解决北京市生活垃圾产生与消纳、处理之间的矛盾提供技术支持。同时也为其他堆肥厂或城市垃圾处理设施的建设、管理与改进提供技术方面的参考。本试验主要选取了温度、含水率、容重、pH 值、电导率(EC)、 E_4/E_6 、水溶性碳(WSC)、固相 C/N、发芽率指数(GI)^[14-17]和粪大肠菌值作为判断堆肥腐熟度的指标,以定量地表征垃圾堆肥物料变化和堆肥产品状况。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计与运行

北京市南宫堆肥厂堆肥原料和堆肥工艺为:堆肥原料(下称原垃圾,来自北京丰台区及宣武区)→马家楼转运站→筛分出 15~80 mm 粒径垃圾→南宫堆肥厂隧道发酵仓好氧堆肥→后熟化发酵→筛分出<25 mm 堆肥→最终熟化发酵→堆肥产品。

以南宫密闭隧道发酵仓为主要试验对象,该发酵

仓长 27 m,高度和宽度均为 4 m。布料机将 15~80 mm 垃圾原料从里到外均匀布入发酵仓中,保持堆垛高度约 2.5 m。本试验以原堆肥周期 56 d 的堆肥化过程作为对照,将发酵周期缩短为 32 d,并考虑在高温发酵阶段添加倒仓破碎工艺,通过各指标的测定来比较 3 种堆肥腐熟度的差异。本试验共设置了以下 3 个堆肥处理:

对照:高温发酵 14 d→后熟化 21 d→最终熟化 21 d,堆肥时间共 56 d,形成堆肥产品;

处理 1: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 2:高温发酵 8 d(第 3 d 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。

倒仓破碎设备型号为 ALLU SM3-23,产地芬兰,运行功率 70 kW,转速 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,最大破碎能力 $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,采用的是辊式破碎方式^[18-19]。

1.2 样品采集

15~80 mm 垃圾原料采自堆肥厂进料口处,而堆肥样品则分别是采自堆肥化的高温发酵、后熟化和最终熟化等各发酵阶段结束时的堆体。沿堆体长度方向等距离设置 3~5 个采样点,每个采样点用采样铲取样 20~30 kg,混合均匀后再用四分法取样 5 kg,并将样品装于塑料袋中,24 h 内即进行室内测定。

1.3 测定指标与测定方法

1.3.1 物料物理学性质指标及其测定方法

(1)测定指标

温度、含水率、容重。

(2)测定方法

堆肥温度利用自动控制室内计算机通过数据线 with 堆体内温度探头连接,自动连续读取堆体温度。温度探头在发酵仓内沿长度方向设置,共计 3 个,两侧探头距离仓口和墙体均为 4.5 m,随时监测堆体约 1.3 m 高度处的温度变化。

将垃圾在 105~110 °C 烘 24 h 至恒重,冷却称重,计算其含水率: $W_i\% = (M - M_f) / M \times 100\%$, 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。

垃圾容重: $B_i = M_i / V_i$, 式中 B_i 为垃圾容重, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; M_i 为垃圾湿基重量,kg; V_i 为垃圾体积, m^3 。

1.3.2 物料化学性质指标及其测定方法

(1)测定指标

pH 值、电导率(EC)、 E_4/E_6 、水溶性碳(WSC)、固

相 C/N。

(2)测定方法

称取样品并将其与蒸馏水以 1:10 (W:V) 充分振荡混合后过滤,以备水溶性指标的测定。用 twin pH B-212 测 pH 值;用 DDS-11A 型电导测定仪测定电导率(EC);用 722 型可见分光光度计于波长 465 和 665 nm 处分别测吸光度值并取两者比值得 E_4/E_6 [20];水溶性碳(WSC)用重铬酸钾氧化法测定 [21]。

将样品彻底风干后,用植物粉碎机粉碎并过 0.149 mm 筛以备固相指标的测定。固相 C/N=总有机碳/总氮,其中总有机碳(TOC)采用重铬酸容量法-外加热法;总氮(TN)采用凯氏定氮法 [22]。

1.3.3 物料生物学性质指标及其测定方法

(1)测定指标

发芽率指数(GI)、粪大肠菌值。

(2)测定方法

GI(%):取 5 mL 浸提液于铺有滤纸的 $\varphi 9$ cm 培养皿中,播 20 粒饱满的小青菜种子,放置 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 培养箱中培养,第 48 h 测种子发芽率 GI, $GI(\%) = (\text{浸提液种子发芽率} \times \text{根长}) / (\text{对照种子发芽率} \times \text{根长}) \times 100\%$ [23]。

粪大肠菌值:多管发酵法。根据发酵试验中不同接种量发酵管出现阳性结果的数目,从 MPN(最可能数)表中查得相对应的 MPN 指数后,按照以下公式计算每升水中粪大肠菌群细菌的 MPN 值 [24]:

$MPN \text{ 值} = MPN \text{ 指数} \times 10(\text{mL}) / \text{接种量最大的一管}(\text{mL})$

室内测定时,每个样品重复测 3 次。

2 试验结果与分析

2.1 缩短发酵时间对物理学指标的影响

(1)隧道高温发酵阶段堆体温度的变化

根据我国 GB 7959—1987 粪便无害化卫生标准的规定:进行高温堆肥时,应至少持续 5 d 保持高温 $50 \sim 55^\circ\text{C}$ 以上 [25-26]。由图 1 可以看出:对照(高温发酵 14 d)和处理 1(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,温度就可达到 55°C 以上,并可在此高温持续 5 d 以上。处理 2(高温发酵 8 d 倒仓破碎 1 次)的高温发酵方式,虽然第 2 d 倒仓使得堆体温度骤减了 15°C 左右,但 5 h 后堆体温度已迅速恢复到 55°C 以上,并且此后连续 5 d 的温度都保持在 55°C 以上。由此可见,单从温度来看,3 种处理的堆肥经过高温发酵都能达到无害化的温度

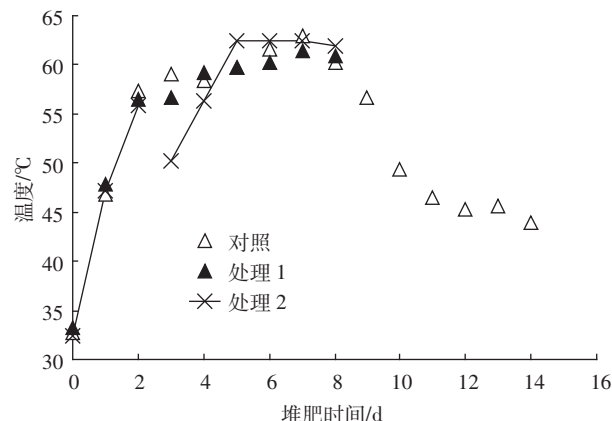


图 1 高温发酵阶段温度随时间的变化

Figure 1 Temperature variation with time during high temperature phase

要求。

(2)堆肥过程中含水率与容重的变化

水分是堆肥中微生物生长代谢所必需的,一般适宜的含水率为重量计的 50%~60%,若超过 70%,则明显降低分解速度,温度也会受到影响。由图 2 可以看出 3 种堆肥处理方式的含水率均随堆肥时间的延长

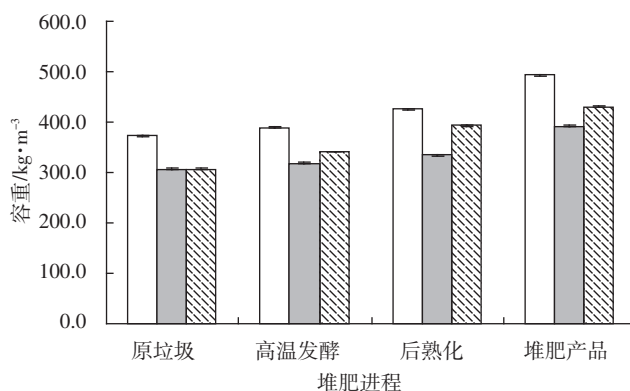
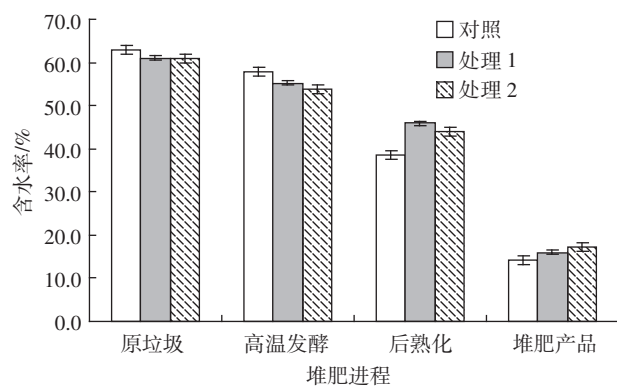


图 2 堆肥过程中物料含水率与容重的变化

Figure 2 Water content and bulk density of the material during composting

而逐渐减少,主要是因为发酵时放出热量而带走大量水分,使得堆肥产品的含水率都明显下降。至堆肥结束时,对照的产品含水率最低,处理 1 产品次之,而处理 2 产品的含水率最高。

3 种处理方式的堆肥容重随时间呈递增趋势,产生这种现象的原因是随堆肥进行,原垃圾中大量固态有机物被微生物不断分解转化为简单、稳定的小分子物质(CO_2 、水蒸汽等),使得垃圾堆体体积不断减小,容重不断增大。但是由图 2 可见,对照在开始时原垃圾的容重就比较大,并且此后堆肥过程中其容重一直较高,这主要是进料时原垃圾的差异在一定程度上造成了其与处理 1、处理 2 在堆肥产品容重上的差异;处理 1 与处理 2 原垃圾的容重之间几乎没有差异,但堆肥产品中,处理 2 容重比处理 1 的大,这是由于破碎作用使得物料粒径更均匀、物料的密实度更大的原因。三者最终产品的容重基本保持在 $400\sim 500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆肥过程中,容重减少大约 $100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.2 缩短发酵时间对化学指标的影响

(1) 堆肥过程中 pH 值与 EC 的变化

pH 值影响微生物的生长和代谢活动,并且在堆肥过程中随时间和温度的变化而变化,一般认为腐熟堆肥的 pH 值为中性或弱碱性^[27]。由图 3 可以看出,不同堆肥处理的物料 pH 值总体均呈上升趋势,但最终均维持在 6.5~7.5 之间。这是因为有机酸不断分解转化,而含 N 有机物分解使氨含量增加,所以堆体的 pH 值上升。但随着堆肥的进行,氨产生量减少,有机酸与之中和,从而使 pH 值渐趋稳定^[28]。至堆肥结束,产品的 pH 值均稳定呈中性或弱碱性,符合堆肥腐熟时的特征。

EC 可反映堆肥浸提液中离子浓度,即可溶性盐的含量。堆肥中的可溶性盐主要由有机酸盐类和无机盐等组成,对作物有毒害作用。鲍士旦等根据土壤浸提液的电导率与含盐量对作物生长的影响得出:电导率值超过 $4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 就会抑制作物的生长^[22]。由图可见,不同处理物料的 EC 值变化趋势基本一致,逐渐下降,这是因为 CO_2 、 NH_3 的挥发,以及胡敏酸物质和阳离子交换量的增加^[5]。虽然 3 种处理的堆肥原料差异造成初始 EC 有所不同,但最终生产出的堆肥产品的 EC 均降到 $4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下,保持在 $2.0\sim 2.5\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,施用于土壤中不会对作物产生毒害,其中对照和处理 2 产品中可溶盐的含量均比处理 1 要低,说明堆肥时间长和倒仓破碎有利于降低堆肥的 EC,腐熟得更好。

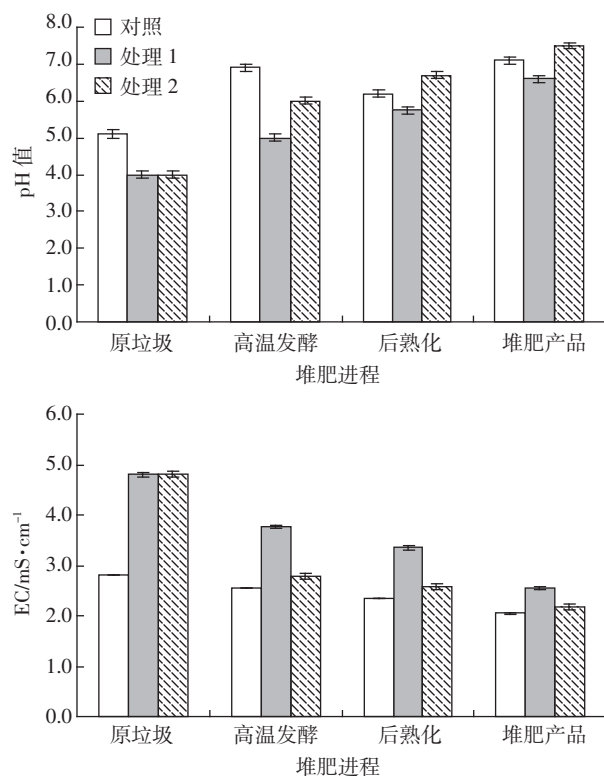


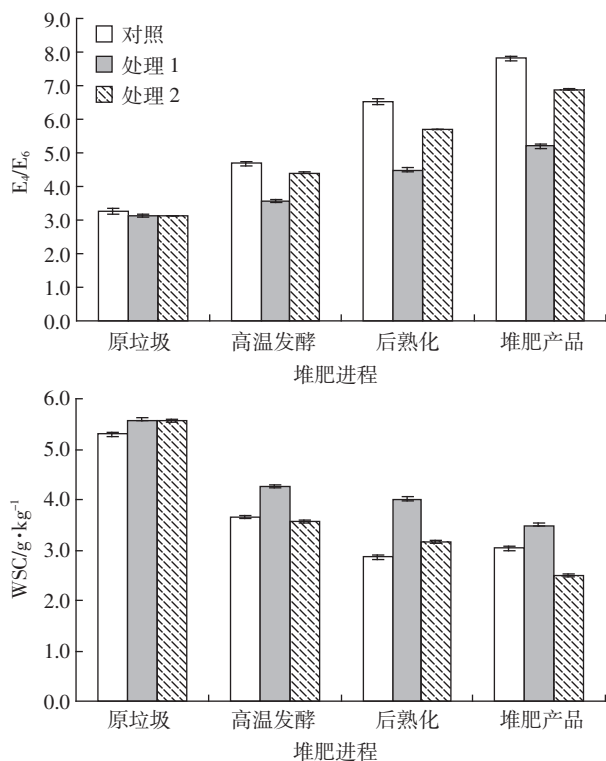
图 3 堆肥过程中物料 pH 值与 EC 的变化

Figure 3 pH and EC of the material during composting

(2) 堆肥过程中 E_4/E_6 与 WSC 的变化

堆肥中腐植酸在波长 465 和 665 nm 处具特异吸收峰值,两处吸光度的比值为 E_4/E_6 。堆肥水浸提液的 E_4/E_6 一般随堆肥腐熟度的提高而增加,这主要是因为水溶性富里酸随着堆肥的进行逐渐转化为缩合度更大的胡敏酸,故堆肥水浸提液的 E_4/E_6 可以作为反映堆肥腐殖化程度的一个重要指标^[20]。由图 4 可以看出,3 种处理的物料水浸提液的 E_4/E_6 随时间延长均呈上升趋势,其中堆肥时间较长的对照和添加倒仓破碎的处理 2 更有利于堆肥的腐熟,两者之间差别较小,且都比处理 1 的腐熟度要好。

堆肥的 WSC 含量与时间有显著相关性,可作为指示堆肥稳定程度的一个参数。并且 Sharon 等人认为当 WSC 含量低于 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时垃圾基本腐熟^[29]。由图 4 可见,各堆肥处理的 WSC 含量由于微生物的不断分解而呈逐渐减少趋势,并且在隧道高温发酵阶段减少的幅度最大,之后小分子有机酸继续分解,物料 WSC 的下降趋势逐渐减小并趋于稳定。3 种处理的最终堆肥产品 WSC 含量均小于 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,已达到腐熟。其中处理 2 产品 WSC 含量低于对照产品,更低于处理 1 产品,腐熟程度更好。

图4 堆肥过程中物料 E₄/E₆ 与 WSC 的变化Figure 4 E₄/E₆ and WSC of the material during composting

(3)堆肥过程中 C/N 的变化

堆肥时 C/N 影响微生物降解有机物的速度,是决定发酵时间长短的主要因素之一,常被作为评价堆肥腐熟度的一个经典参数。不腐熟的堆肥施入土壤后,过高的 C/N 会导致“氮饥饿”,不利于植物生长;过低的 C/N,又会使微生物无法利用的氮素大量流失,流失的氮素随地表径流进入水体,从而引起水体富营养化。通常垃圾堆肥在腐熟时的 C/N 会降低到 15~20,即表明堆肥已达到稳定状态。由图 5 可见,3 种处理的 C/N 在整个堆肥过程中均呈下降趋势,从堆肥开

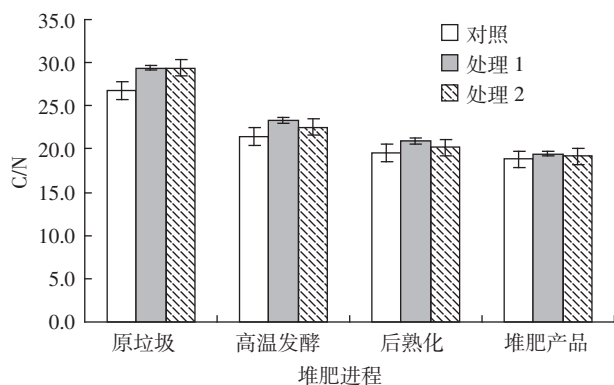


图5 堆肥过程中物料 C/N 的变化

Figure 5 C/N of the material during composting

始时的 25~30,降至高温隧道发酵后的 20~25,直至最终产品时,物料的 C/N 已低于 20,按照垃圾腐熟时 C/N 应小于 20 的标准来衡量^[30],堆肥产品均已腐熟。

2.3 缩短发酵时间对生物学指标的影响

(1)堆肥过程中 GI 的变化

未腐熟的堆肥中含有植物毒性物质,抑制植物正常生长,因此 GI 常被用来衡量堆肥的腐熟程度。通常当堆肥水浸提液的 GI 大于 50%时可认为堆肥对植物基本没有毒害作用,当 GI 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,堆肥已完全腐熟^[31]。由图 6 可见,在堆肥过程中,各处理物料的 GI 值随时间均呈增加趋势。因发酵时间较长,对照的物料水浸提液 GI 增加最明显,至堆肥结束时其产品的 GI 已达 100%,添加倒仓破碎的处理 2 次之,产品的 GI 达到 80%,虽不倒仓不破碎的处理 1 腐熟效果较差,但至堆肥结束时其产品的 GI 也达到 58%。由此可见,虽然堆肥周期缩短,但添加倒仓破碎工艺后,仍能使堆肥产品保持较高的腐熟度,可以达到不缩短堆肥周期时同样的腐熟效果。处理 1 和处理 2 在高温发酵结束时物料的 GI 明显下降,但此后逐渐回升,这是因为高温期微生物分解有机物质作用强烈,释放出大量有机酸和铵态氮,抑制植物正常生长^[28]。但随着堆肥进行,至后熟化和最终熟化阶段时堆肥的腐熟度提高,GI 恢复效果明显,至发酵结束时堆肥产品已完全腐熟,对植物基本没有毒害作用。

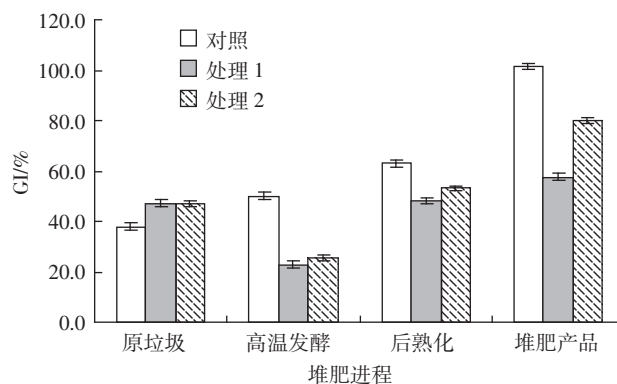


图6 堆肥过程中物料 GI 的变化

Figure 6 GI of the material during composting

(2)堆肥过程中粪大肠菌值的变化

粪大肠菌可以作为堆肥无害化与否的一种指示菌^[14]。根据我国 GB 7959—1987 粪便无害化卫生标准:经高温无害化处理后,堆肥中的粪大肠菌值不应超出 0.1~0.01 的范围^[26]。由表 1 可以看出,粪大肠菌值随时间呈增加趋势,原垃圾中粪大肠菌值的检出率

表 1 堆肥过程中粪大肠菌值的变化

Table 1 The relevant number of coliform group during composting

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	2.00	1.65	1.90
堆肥产品	2.24	1.80	1.95

几乎为100%,而高温发酵基本将粪大肠菌全部杀灭,高温结束后,粪大肠菌值为0.06~0.08,完全符合粪便无害化卫生标准规定的值0.10~0.01。对照处理的无害化效果最好,处理2的无害化效果比处理1好,由此说明,将高温发酵时间由14 d缩短为8 d完全能够达到堆肥无害化的要求,并且倒仓破碎更有利于垃圾堆肥的无害化。

3 结论

综合温度、含水率、容重、pH值、电导率(EC)、E₄/E₆、水溶性碳(WSC)、固相C/N、发芽率指数(GI)和粪大肠菌值各个指标来看,3种处理的堆肥产品均能达到腐熟。其中,与高温发酵14 d、发酵时间共56 d的堆肥产品相比,高温发酵8 d不倒仓不破碎、发酵时间共32 d的堆肥产品腐熟水平明显有所下降。在缩短发酵周期基础上,于高温发酵第3 d倒仓破碎1次,其堆肥产品的腐熟度水平可以得到保持。因此,将高温隧道发酵时间缩短为8 d第3 d倒仓破碎1次发酵周期共32 d,可以替代现有的高温发酵14 d不倒仓不破碎发酵周期共56 d的堆肥工艺,不仅能够保证堆肥产品的品质,还能缩短堆肥周期,加快垃圾的流通速度,实现大幅提高南宫堆肥厂垃圾处理能力的目标。

参考文献:

- [1] 张 颖, 张小丹. 固体废物的资源化和综合利用技术[J]. 环境科学研究, 1998, 11(3):49.
ZHANG Ying, ZHANG Xiao-dan. Resource recovery and comprehensive utilization technology of solid waste[J]. *Research of Environmental Science*, 1998, 11(3):49.
- [2] Gao Guang, Dong Yawen, Jin Haobo, et al. Researches on countermeasures of municipal waste disposal and management[J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2000, 13(2):39-41.
- [3] 张宪生, 沈吉敏, 利 伟, 等. 城市生活垃圾处理处置现状分析[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(4):60-64.
ZHANG Xian-sheng, SHEN Ji-min, LI Wei, et al. Disposal and treatment of municipal solid waste: state-of-the-art[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2003, 3(4):60-64.
- [4] 张业健, 周海东. 论城市生活垃圾综合处理[J]. 辽宁城乡环境科技, 2002, 22(5):50.
ZHANG Ye-jian, ZHOU Hai-dong. Discussion on necessity of comprehensive treatment of municipal solid waste[J]. *Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology*, 2002, 22(5):50.
- [5] 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):201-205.
LI Chun-ping, LI Guo-xue, LI Yu-chun, et al. Fuzzy mathematics-based evaluation of MSW compost maturities in different spaces in static tunnel from NANGONG compost Plant[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2):201-205.
- [6] 臧文超. 我国固体废物污染防治现状、问题及对策[J]. 环境保护科学, 1995, 21(2):57-60.
ZANG Wen-chao. The situation, problem and countermeasure of solid waste pollution control in China[J]. *Environmental Protection Science*, 1995, 21(2):57-60.
- [7] Maier R M, Pepper I L, Gerba C P. Environmental microbiology[M]. San Diego, California, USA: Academic Press, 2000.
- [8] 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.
WANG Bao-liang. New technology integrated townie garbage utilization[J]. *Science-Technical on Middle-Small Business*, 2005, 11:43-44.
- [9] 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.
CHEN Tong-bin, LUO Wei, ZHENG Guo-di, et al. Effects of pile-turning on chemical and physical properties in static forced-aeration composting of sewage sludge and pig manure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(1):117-122.
- [10] 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.
- [11] J M Agnew, J J Leonard. The physical properties of compost[J]. *Compost Science & Utilization*, 2003, 11(3):238.
- [12] D L Elwell, J H Hong, H M Keener. Composting hog manure/sawdust mixtures using intermittent and continuous aeration: ammonia emissions[J]. *Compost Science & Utilization*, 2002, 10(2):142-150.
- [13] William Hogland, Torleif Bramryd, Marcia Marques, et al. Physical, chemical and biological processes for optimizing decentralized composting[J]. *Compost Science & Utilization*, 2003, 11(4):330.
- [14] 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.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Technology for production of composting and organic compound fertilizer[M]. Beijing: Chemical Industry, 2000:135-148.
- [15] Stentiford E I, Pereira-Neto J T, Mara D D. Low cost composting: research monographs in tropical public health engineering[R]. Department of Civil Engineering, University of Leeds, 1996.
- [16] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废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]. *Environmental Science*, 1999, 20(2):98-103.
- [17] Claudio Mondini, Maria Teresa Dell Abate, Liviana Leita, et al. An integrated chemical, thermal, and microbiological approach to compost stability evaluation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(6):2379.
- [18] 孙明湖. 环境保护设备选用手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- SUN Ming-hu. The enchriridion of environmental protection[M]. Beijing: Chemical Industry, 2002.
- [19] 曾明, 付建科. 现代破碎原理及国外新型破碎机[J]. 制冷空调与电力机械, 1996, 18(3):13-16.
- ZENG Ming, FU Jian-ke. Modern crushing principle and the latest foreign crushers[J]. *Construction Machinery for Hydraulic Engineering & Power Station*, 1996, 18(3):13-16.
- [20] Stevenson F J 著. 夏荣基译. 腐殖质化学[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1994.
- Stevenson F J. Interpreted by XIA Rong ji. Humus chemistry[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Publishing Company, 1994.
- [21] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社, 2000.
- Nanjing Agricultural University. Soil analysis in agricultural chemistry [M]. Beijing: Agriculture Publishing Company, 2000.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Publishing Company, 2000.
- [23] Chefetz B, Hatcher P G, Hadar Y, et al. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste[J]. *J Environ Qual*, 1996, 25:776-785.
- [24] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. The analysis monitoring methods of water and waste water[M]. Beijing: China Environmental Sciences Publishing Company, 2002.
- [25] 丁文川, 郝以琼, 李宏. 污泥堆肥温度对微生物降解有机质的影响[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(6):20-23.
- DING Wen-chuan, HAO Yi-qiong, LI Hong. The effect of temperature on degradation of organic matter by microbes during sludge composting [J]. *Journal of Chongqing Architecture University*, 1999, 21(6):20-23.
- [26] GB 7959—1987. 中华人民共和国卫生部. 粪便无害化卫生标准[S]. GB 7959—1987. Ministry of Health of the People's Republic of China. Sanitary standard for the non-hazardous treatment of night soil[S].
- [27] Nakasaki K, Yaguchii H, Sasaki Y, et al. Effects of pH control on composting of garbage[J]. *Waste Management & Research*, 1993, 11:117-125.
- [28] 秦莉, 李玉春, 李国学, 等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12):189-194.
- QIN Li, LI Yu-chun, LI Guo-xue, et al. Maturity indexes and operational parameters during composting municipal solid waste[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12):189-194.
- [29] Sharon Z, Omer M, Jorge T. Dissolved organic carbon(DOC) as a parameter of compost maturity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 2:2109-2116.
- [30] 杨朝晖, 曾光明, 蒋晓云, 等. 城市垃圾堆肥过程中的生物学问题研究[J]. 微生物学杂志, 2005, 25(3):57-61.
- YANG Zhao-hui, ZENG Guang-ming, JIANG Xiao-yun, et al. Biological problems in urban garbage composting process[J]. *Journal of Microbiology*, 2005, 25(3):57-61.
- [31] P Wang, C M Changa, M E Watson, et al. Maturity indices for composted dairy and pig manures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36:767-776.