

菌、热及菌热联合对垃圾堆肥腐熟的比较分析

张红玉,马志宏,李国学*,王 坤,臧 冰,杨金兵,张 峰

(中国农业大学资源与环境学院环境科学与工程系,北京 100193)

摘 要:为研究菌剂、余热及其联合作用对堆肥腐熟度的影响,采用强制通风静态堆肥系统,以现有堆肥工艺为对照(CK),比较研究了添加菌剂(T1)、余热利用(T2)、添加菌剂并利用余热(T3)3种工艺垃圾对堆肥过程中腐熟度的影响。结果表明:从温度、pH、电导率(EC)、腐植酸光学特性(E_4/E_6)、水溶性碳(WSC)、固相 C/N 和发芽率指数(GI)来看,4个处理均达到腐熟;添加菌剂(T1)对 EC、 E_4/E_6 、WSC、C/N 和 GI 有显著影响,除 E_4/E_6 、WSC 和 C/N 外,循环热风(T2)对其余腐熟度指标有显著影响,菌剂和余热的联合作用可显著提高堆肥的腐熟度,且二者对堆肥腐熟度的影响是一种协同作用。

关键词:城市生活垃圾;堆肥;菌剂;余热利用;腐熟度

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)07-1430-06

Comparative Study of the Effect of Agents, Heat and Combined Agents and Heat on Composting Maturity of Municipal Solid Waste

ZHANG Hong-yu, MA Zhi-hong, LI Guo-xue*, WANG Kun, ZANG Bing, YANG Jin-bing, ZHANG Feng

(Department of Environment Science and Environment Engineering, College of Resource and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to explore the effect of inoculating exogenous microbial agents and recycling waste heat on compost maturity of municipal solid waste based on forced-aeration static-piles composting system. The treatments were designed as follows: inoculated agents(T1), recycling waste heat(T2), both inoculated exogenous microbial agents and recycling waste heat(T3), and the conventional compost as control (CK). The maturity indexes were analyzed during composting. The results showed that all compost products reached maturity according to temperature, pH, electrical conductivity(EC), E_4/E_6 , water soluble carbon(WSC), C/N ratio and germination index(GI). T1 had a significant influence on EC, E_4/E_6 , WSC, C/N ratio and GI. In addition to E_4/E_6 , WSC and C/N ratio, recycling waste heat presented a significant influence on other maturity indices, and a significant difference between four trials($P<0.05$) for all maturity index. It was shown that the combined effects of exogenous microbial agents and the waste heat were significantly improved the maturity of municipal solid waste composting, and the two aspects played a synergistic effect on maturity. This research has provided a better way to improve the maturity of the compost, and the theory evidence for improving design of future MSW composting plants.

Keywords: municipal solid waste; composting; agents; circulated waste heat; maturity

生活垃圾中有机物组分的不断增加和生活垃圾在农田中直接施用的限制使得高温堆肥技术倍受青睐^[1-2]。通过高温堆肥无害化处理,生活垃圾中的有机

物可以快速分解并转化形成有机肥,是一种良好的土壤改良剂。然而,未腐熟的堆肥施用于土壤后,由于有毒组分的存在,严重影响了作物生长^[3-4]。因此,国内外在加快生活垃圾堆肥腐熟的技术方面,做了大量研究,通过堆肥物料 C/N 调节,在堆肥过程中添加复合微生物和提高堆肥反应温度,以促进微生物对有机物的分解转化,加速腐熟过程^[5-6]。在这个过程中,温度、通风等调控会增加堆肥处理成本^[7-8]。在堆肥过程中,有机物的好氧分解会产生大量的热能。Klejment 等研究表明在高温发酵阶段平均排放 $1\ 136\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的热能,这部分热能随堆肥废气经过加湿降温后,采用生

收稿日期:2011-01-04

基金项目:国家重大水专项“畜禽养殖粪污资源化处理技术与示范”(2008ZX807209-03-3);国家自然科学基金“基于 N 素损失原位控制的厨余垃圾堆肥过程中臭气产生规律和控制”(41075110);中国农业大学研究生科研创新专项资助(15050204);广州省院基金“有机废弃物快速好氧堆肥技术与工程示范”(2010A090100035-07)

作者简介:张红玉(1983—),女,陕西合阳人,博士生,主要从事固体废物处理与资源化研究。E-mail:zhzy280392747@sohu.com

*通讯作者:李国学 E-mail:ligx@cau.edu.cn

物过滤进行净化处理^[9-10],如果将这部分热能作为提高堆肥温度的热源,不但能够促进堆肥腐熟,而且可以减少资源浪费。目前,菌剂添加、热能循环利用以及两者的联合作用在促进堆肥腐熟方面的研究鲜见报道。本研究以北京南宫堆肥厂强制通风静态堆肥发酵仓作为试验场所,以现有的堆肥工艺作为对照,比较研究添加菌剂、余热利用、添加菌剂并利用余热3种堆肥处理技术的腐熟度指标,以确定最佳的堆肥工艺,从而为南宫堆肥厂的工艺优化与革新提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

来源于北京市丰台区的生活垃圾,经马家楼转运站筛分后,其中15~80 mm的垃圾被运往南宫堆肥厂进行堆肥处理,采用的堆肥工艺是静态好氧隧道发酵,目前的工艺流程是:15~80 mm生活垃圾原料→8 d 密闭隧道高温发酵→12 d 后熟化发酵→12 d 最终熟化发酵。堆肥原料的容重为350~650 kg·m⁻³,易堆腐有机物占20%~80%,含水率50%~60%。

1.2 试验方法

试验于2010年4月4日—4月30日在南宫堆肥厂进行。单个堆肥发酵仓长27 m、宽4 m、高4 m。选取4个隧道发酵仓,在堆肥过程中分别设置添加菌剂(T1)、利用余热(T2)、添加菌剂并利用余热(T3)3个处理,同时以不添加菌剂和不利用余热的处理(CK)作为对照。试验采用苏柯汉(潍坊)生物工程有限公司提供的城市垃圾处理超浓缩固体专用菌(SUKAZYE-MW011BC 固体菌剂),它是一种具有生物活性的物质,含有大量需氧和厌氧型酶组成的细菌。含有6种可提供高质淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶和纤维素酶的细菌,种类包括枯草杆菌、苔藓菌、多粘菌、曲霉菌、诺卡氏菌等。将固体菌剂用水稀释100倍后,按照每吨生活垃圾(湿基)20 g 菌剂的比例,通过水泵均匀地喷洒到传送皮带上的生活垃圾层。热风的循环利用主要是将堆肥高温发酵过程中产生的热能回用在堆肥的初期,通过通风管道将其他发酵仓的热能收集后直接引入到布料完成后的发酵仓,在堆肥的初期仅利用循环热风,当堆体温度上升至65℃时,停止热风使用,改为原来的风机鼓风。堆制期间,每个仓选取前、中、后3个部分,每部分选取上、中、下3个点进行采样,共计9个采样点,分别在0、4、8、20、32 d 取样,测定pH、电导率(EC)、腐植酸光学特性(E₄/E₆)、水溶性碳(WSC)质量分数、总有机碳(TOC)、总氮(TN)、固

相样品的C/N和发芽率指数(GI),研究添加菌剂和余热利用以及它们的联合作用对堆肥腐熟度的影响。

1.3 分析方法

堆肥温度,通过连接电脑的温度传感器直接读取;含水率,105℃下烘干至恒重;将垃圾样品按1:10(W:V)浸提过滤。用twin pH B-212 pH计(成都光谱科学仪器有限公司)测pH值;EC值用DDS-11A型电导测定仪(深圳市同奥科技有限公司)测定;E₄/E₆用722型可见光分光光度计(上海天普分析仪器有限公司)于465 nm和665 nm处分别测定吸光度值并取两者之比;水溶性碳(WSC)质量分数用重铬酸钾氧化法测定^[11];固相C/N为总有机碳质量/总氮质量;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)采用重铬酸钾容量法-外加加热法测定,总氮(TN)采用凯氏定氮法测定^[12];GI的测定是取上述浸提液8 mL于垫有滤纸的培养皿中,取10粒饱满的小青菜种子,然后放置在(20±1)℃的培养箱中培养,96 h 测定发芽率^[13]。数据统计分析采用SPSS 13.0 for Windows 软件中单因变量多因素方差分析方法完成。

2 结果与分析

2.1 温度的变化

在好氧堆肥过程中,温度是重要因素^[14],温度的高低会影响微生物的种类和生长。4个处理高温发酵阶段温度的变化如图1所示,CK、T1、T2和T3分别在堆肥的第4、3、3、2 d 堆体温度上升到55℃,并在此温度下分别维持了5、6、6、7 d,按照我国生活垃圾堆肥厂运行管理规范(DB11/T 272—2005)在55℃维持5~7 d的要求^[15],4个处理均达到堆肥无害化的要求。与CK相比,T1添加菌剂后,堆体的反应温度明显上升,表明菌剂的添加加速了有机物的分解转化,使

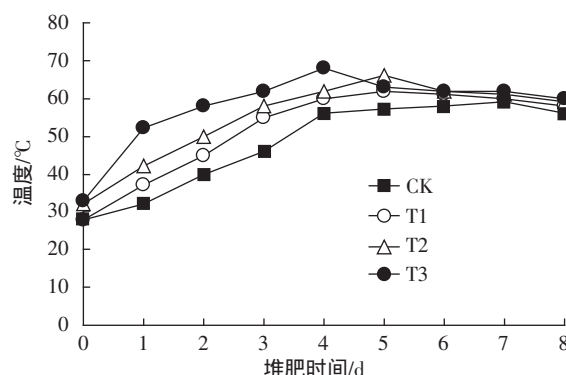


图1 高温阶段不同处理温度变化

Figure 1 Changes of temperature of four trials

得堆体产生了更多的热量;当堆体温度上升到 58°C 时,垃圾堆体的微生物活性就会不断加强,堆体温度上升到 60°C 时,微生物的种类就会不断增加^[16],T2 处理的升温速度明显高于 CK 和 T1 处理,在堆肥的第 3 d 堆体温度就达到 58°C ,第 4 d 就达到 62°C ,这种温度环境提高了堆体内微生物的活性和多样性,进一步加快有机物的分解,因而加速了堆体温度的升高。T3 处理兼有前两种升温特性,因此堆体的升温速度最快,使得堆肥进入高温期的时间比对照缩短了 2 d,比 T1 和 T2 缩短了 1 d。方差分析表明 4 个处理之间差异显著($P=0.028<0.05$),且余热对温度变化具有显著影响($P<0.05$)。

2.2 pH 的变化

受堆肥原料和条件的影响,堆肥过程中 pH 值的变化较大,所以一般将 pH 值作为判断堆肥腐熟度的参考指标而不是定性指标,腐熟的堆肥一般呈弱碱性。由图 2 可以看出,随着有机物的分解,有机氮的矿化作用使得 4 个堆肥处理的 pH 逐渐上升,在堆肥的第 20 d,发酵物料的 pH 值均达到最高值,随着堆肥的腐熟,由于 NH_3 挥发速率降低以及硝化菌的硝化作用产生的 H^+ 和有机物分解产生的有机酸^[17-18],各处

理的 pH 值均逐渐降低。堆肥结束时,4 个堆肥产品的 pH 值降到 6.7~7.7 之间,表明对照堆肥产品的腐熟度相对较差,其余堆肥产品均达到完全腐熟^[19]。方差分析表明 4 个处理差异显著($P<0.05$),且余热对 pH 变化具有显著影响($P<0.05$)。

2.3 电导率(EC)的变化

电导率(EC)反映了堆肥浸提液中的离子浓度^[20]。由图 3 可以看出,4 个处理的 EC 值的变化趋势基本一致。随着堆肥的进行,EC 值在前 4 d 呈现较高值,这是因为在堆肥初始阶段,微生物代谢旺盛,活动加剧,堆肥物料剧烈分解产生大量的小分子有机酸和各种离子(NH_4^+ 、 HCO_3^- 、 H^+ 等),从而使得 EC 值上升。

随后由于二氧化碳、氨气的挥发,以及胡敏酸物质含量的升高和阳离子交换量的升高,EC 值下降^[21]。堆肥结束时,4 个处理的 EC 都小于 $3.00\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,表明在作物生长安全范围之内,不会对作物的生长产生毒害作用^[22]。与 CK 相比,T1、T2 和 T3 最终堆肥产品的 EC 值分别降低了 0.4、0.3 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 0.9 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,T1 和 T2 的 EC 降低值之和小于 T3 的降低值,可见菌剂和余热的联合利用对 EC 的影响并不是简单的相加作用,而是一种协同作用。方差分析表明 4 个处

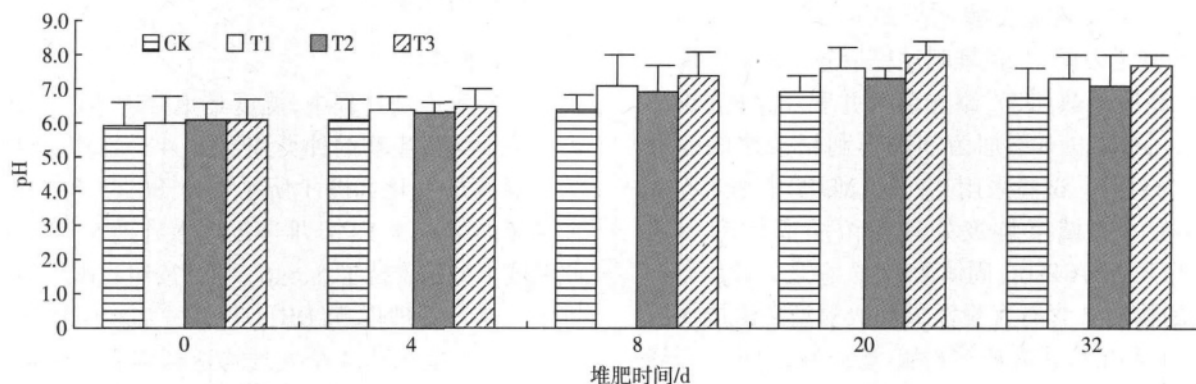


图 2 堆肥过程中 pH 的变化
Figure 2 Changes of pH of four trials

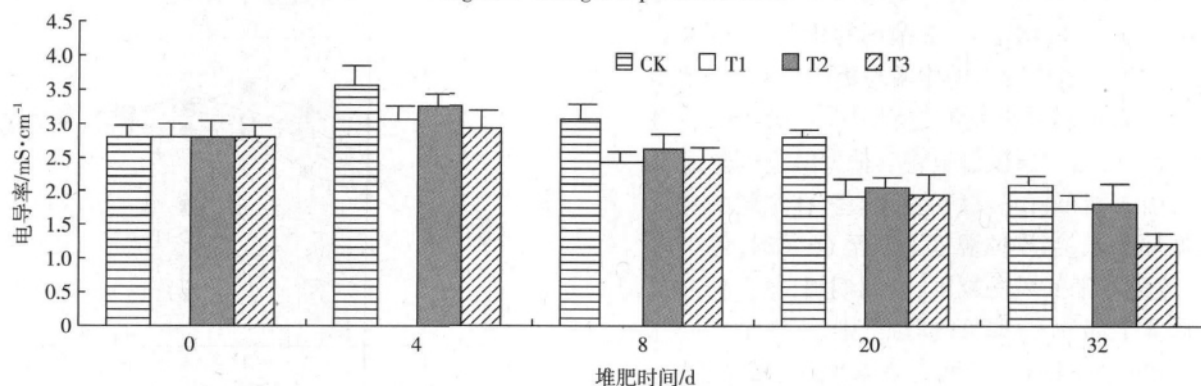


图 3 堆肥过程中电导率的变化
Figure 3 Changes of electrical conductivity of four trials

理差异极显著($P=0.001$),菌剂添加和热风循环利用均对 EC 的变化有显著影响($P_{\text{菌剂}}=0.01$, $P_{\text{余热}}=0.03$)。

2.4 腐植酸光学特性(E_4/E_6)的变化

E_4/E_6 是堆肥腐殖化作用大小的重要指标,其高低直接与腐植酸的分子大小或者分子的缩合度大小有关,通常随着堆肥液相(水浸提液)腐植酸相对分子质量或缩合度的减小而增加^[23]。从图4可以看出,4个堆肥处理的 E_4/E_6 值均随堆肥的进行而呈上升趋势,表明随着堆肥时间的延长,腐植酸向着分子量越来越大和缩合度越来越高的方向转化。从堆肥腐殖化作用的本质来看,主要是小分子腐植酸向着大分子腐植酸转化,或者由小分子的富里酸向着大分子的胡敏酸甚至更大分子的胡敏素方向转化。与 CK 相比,T1、T2 和 T3 最终堆肥产品的 E_4/E_6 值分别升高了2.0、1.5 和 3.8,T1 和 T2 的 E_4/E_6 升高值之和小于 T3 的 E_4/E_6 升高值,可见菌剂和余热的联合利用对 E_4/E_6 的影响并不是简单的相加作用,而是一种协同作用。方差分析表明4个处理差异极显著($P=0.002$),菌剂添加对 E_4/E_6 的变化有显著影响($P<0.05$)。

2.5 水溶性碳(WSC)的变化

水溶性碳(WSC)是最易界定堆肥稳定性的生物

学指标之一^[24]。由图5可以看出,在堆肥的前4d,WSC 含量呈逐渐上升趋势,表明堆肥中溶解的简单有机物要多于被微生物分解利用的有机物,新增加的 WSC 也可能是由堆肥过程中微生物的合成作用形成^[25]。随着堆肥的进行,WSC 含量逐渐下降。在堆肥结束时,4个处理的 WSC 含量均下降到 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,表明基本腐熟^[26]。与 CK 相比,T1、T2 和 T3 最终堆肥产品的 WSC 值分别降低了0.8、0.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 1.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,T1 和 T2 的 WSC 降低值之和小于 T3 的 WSC 降低值,可见菌剂和余热的联合利用对 WSC 的影响是一种协同作用。方差分析表明4个处理的 WSC 差异显著($P<0.05$),菌剂添加对 WSC 有显著影响($P<0.05$)。

2.6 总有机碳(TOC)、总氮(TN)和 C/N 比的变化

从表1可以看出,4个处理的总有机碳含量随着堆肥时间的推移均呈下降趋势,在堆肥的初期(0~4d),随着温度的升高,有机物的降解较剧烈,有机碳含量呈现较大的下降幅度,堆肥结束时4个处理总有机碳的降解率分别是37%、38.9%、37.6%和40.8%,与 CK 相比,T1、T2 和 T3 最终堆肥产品的 TOC 值分别降低了3.8、2.0 和 9.7,可见单独使用菌剂和余热利用均能

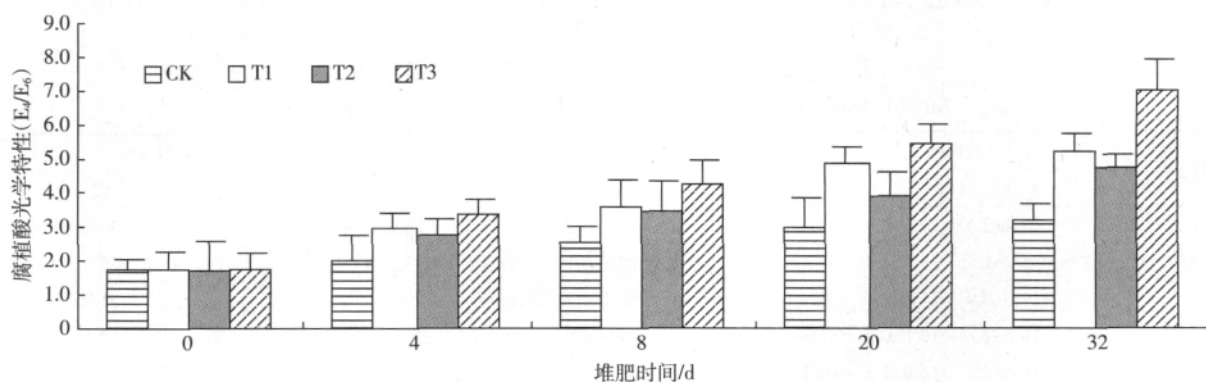


图4 堆肥过程中腐植酸光学特性(E_4/E_6)的变化

Figure 4 Changes of E_4/E_6 of four trials

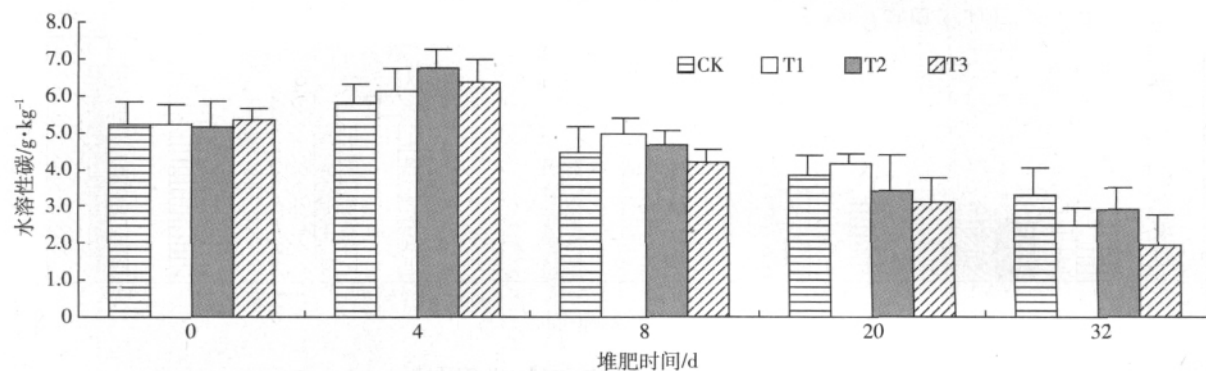


图5 堆肥过程中水溶性碳(WSC)的变化

Figure 5 Changes of water-soluble carbon of four trials

促进有机物的分解,且菌剂添加的效果较明显,而 T3 即菌热联合使用的处理其有机物降解效果最明显。

从总氮含量变化来看,T1 和 T3 的总氮含量在高温发酵阶段呈上升趋势,随后由于氨气的挥发逐渐下降,而 CK 和 T2 在整个堆肥过程中均呈缓慢下降的趋势。4 个处理的总氮降解率分别为 16.3%、12.5%、15.7%和 8.7%,表明添加菌剂可以达到固氮的效果,菌热的联合作用有效地降低了氮素损失。由于总有机碳的降解幅度明显高于总氮,导致 4 个处理的 C/N 均呈下降的趋势,堆肥结束时 4 个堆肥产品的 C/N 均在 16.3%~20.0%,表明堆肥达到腐熟。方差分析表明 4 个处理的 C/N 差异显著($P<0.05$),菌剂添加对 C/N 的影响显著($P<0.05$)。

2.7 发芽率指数(GI)的变化

发芽率指数(GI)是一个重要的腐熟度评价指标。当发芽率指数(GI)大于 50%时可以认为堆肥对植物基本没有毒害,当 GI 大于 80%时,可认为对植物完全没有毒性^[27]。图 6 为各处理不同阶段样品浸提液的发芽率指数,可以看出,堆肥处理对降低生活垃圾的毒害性具有明显作用,随着堆肥的进行,物料中有害物质不断得到分解转化,堆肥结束时 4 个处理的 GI 均大于 80%,表明堆肥达到腐熟,与 CK 相比,T1,

T2 和 T3 最终堆肥产品的 GI 值分别升高了 10.2%、8.4%和 20.3%,T1 和 T2 的 GI 升高值之和小于 T3 的 GI 升高值,可见菌剂和余热的联合利用对 GI 的影响是一种协同作用。方差分析表明 4 个处理的 GI 差异显著($P<0.05$),菌剂添加和余热利用均对 GI 的变化有显著影响($P_{\text{菌剂}}=0.02$, $P_{\text{余热}}=0.03$)。

3 结论与建议

(1)从温度指标来看,4 个堆肥处理经过 8 d 高温发酵,基本能达到病原微生物灭活的要求,符合生活垃圾堆肥厂运行管理规范(DB11/T 272—2005)对温度的要求,与对照相比,菌剂添加和余热利用均可以使堆肥进入高温期的时间缩短 1 d,而两者的联合作用可以使堆肥进入高温期的时间缩短 2 d,且余热利用对温度的变化有显著影响。

(2)从 pH、EC、 E_4/E_6 、WSC 质量分数、固相 C/N 和 GI 等指标来看,4 个处理的垃圾堆肥均达到了基本腐熟,统计分析表明余热利用对 pH、电导率和 GI 变化有显著影响,除 pH 外,菌剂添加对其余腐熟度指标均有显著影响。

(4)从堆肥技术来看,菌热联合作用很大程度上提高了堆肥腐熟度,缩短了堆肥进入高温期的时间,

表 1 堆肥过程中总有机碳(TOC)、总氮和 C/N 的变化

Table 1 Total carbon, TKN and C:N ratio for each trial during composting

堆肥时间/d	TOC/%				TN/g·kg ⁻¹				C:N ratio			
	CK	T1	T2	T3	CK	T1	T2	T3	CK	T1	T2	T3
0	27.2±1.7	27.4±2.5	27.1±1.9	27.3±2.3	10.4±1.3	10.4±1.2	10.4±1.2	10.4±0.2	26.1	26.4	26.0	26.3
4	25.8±2.6	25.2±1.7	24.8±1.2	24.2±1.8	10.0±0.9	10.6±0.7	9.9±1.3	10.7±1.0	25.8	23.8	25.0	22.6
8	22.8±2.5	21.6±0.9	21.0±2.4	20.0±0.5	9.5±0.8	10.7±1.2	9.7±1.0	10.9±1.2	24.0	20.2	21.7	18.4
20	20.0±1.4	18.6±1.8	18.1±0.8	17.3±1.7	9.0±1.4	9.6±2.0	9.0±1.7	9.9±1.4	22.2	19.4	20.1	17.5
32	17.5±0.7	16.8±2.2	16.9±1.5	16.2±2.1	8.7±0.5	9.1±1.0	8.8±1.1	9.5±0.5	19.7	18.4	19.2	17.0

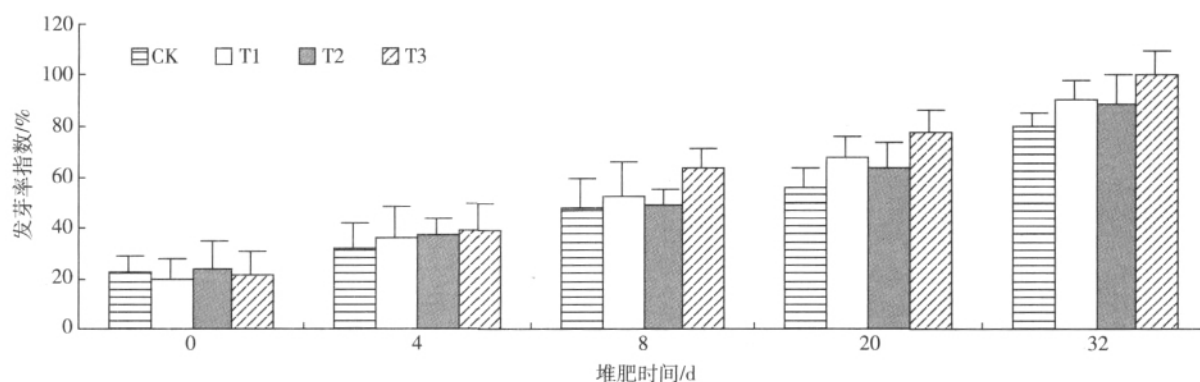


图 6 堆肥过程中发芽率指数(GI)的变化

Figure 6 Changes of germination index of four trials

因此在采用该堆肥工艺时,可以根据实际堆肥的腐熟情况,加速堆肥进程,从而提升生活垃圾堆肥厂的处理能力。

(5)堆肥过程中的余热循环利用后,不但节约了能源,余热和菌剂的联合作用有效促进了堆肥的腐熟,因此未来垃圾堆肥厂建设时可以将余热和菌剂联合使用作为重要的设计环节。

(6)试验过程中,余热的利用率约为50%~60%,剩余部分的余热还需要降温后采用生物滤池进行处理;下一步的研究可进一步探索剩余部分余热的利用途径,并制定有效的启用方案。此外,应深入探索余热和菌剂联合使用提高堆肥腐熟度的机理。

参考文献:

- [1] 北京市市政管理委员会. 北京市绿色奥运城市垃圾全程管理体系研究[R]. 2002.
Municipal Administration Commission of Beijing. Study on management system applying to municipal solid waste of the "Green Olympics" city of Beijing [R]. 2002.
- [2] Elango D, Thinakaran N, Panneerselvam P, et al. Thermophilic composting of municipal solid waste[J]. *Applied Energy*, 2009, 86 :663-668.
- [3] Chen KS, Lin YS, Yang SS. Application of thermotolerant microorganisms for biofertilizer preparation[J]. *J Microbiol Immunol Infect*, 2007, 40 (6) :462-73.
- [4] Fernandez J, Hernández D, Plaza C, et al. Organic matter in degraded agricultural soils amended with composted and thermally-dried sewage sludge [J]. *Sci Total Environ*, 2007, 378(1-2) :75-80.
- [5] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C、N 比堆肥碳素物质变化规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7) :1388-1393.
QIN Li, SHEN Yu-jin, LI Guo-xue, et al. C Matter change of composting with different C/N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (7) :1388-1393.
- [6] Wei Z, Xi B, Zhao Y, et al. Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2) :368-374.
- [7] Raut M, Prince William S, Bhattacharyya J, et al. Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste : A compost maturity analysis perspective[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99 :6512-6519.
- [8] Xiao Yong, Zeng Guang-Ming, Zhao-Hui Yang, et al. Continuous thermophilic composting(CTC) for rapid biodegradation and maturation of organic municipal solid waste [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100 :4807-4813.
- [9] Klejment E, Rosin ski M. Testing of thermal properties of compost from municipal waste with a view to using it as a renewable, low temperature heat source[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99 :8850-8855.
- [10] Cadena E, Colón J, Sánchez A, et al. A methodology to determine gaseous emissions in a composting plant[J]. *Waste Management*, 2009 (29) :2799-2807.
- [11] 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.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 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.
- [13] Sellami F, Hachicha S, Chtourou M, et al. Maturity assessment of composted olive mill wastes using UV spectra and humification parameters [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99 :6900-6907.
- [14] 席北斗, 李英军, 刘鸿亮, 等. 温度对生活垃圾堆肥效率的影响[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 6(7) :34-36.
XI Bei-dou, LI Ying-jun, LIU Hong-liang, et al. Effects of temperature on composting process of municipal solid waste[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 6(7) :34-36.
- [15] DB11/T 272—2005. 生活垃圾堆肥厂运行管理规范[S].
DB11/T 272—2005. The management practices for solid waste composting plant, China[S].
- [16] Tiquia S. Microbial community dynamics in manure composts based on 16S and 18S rDNA T-RFLP profiles[J]. *Environ Technol*, 2005, 26, 1101-1114.
- [17] Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments, Nitrogen turnover and losses[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74 :125-133.
- [18] Mathur S. Composting processes[M]//Martin A M, Ed. Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products. New York :Elsevier, 1991 :147-186.
- [19] Masó M, Blasi A. Evaluation of composting as a strategy for managing organic wastes from a municipal market in Nicaragua[J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99 :5120-5124.
- [20] 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.
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 the Nangong compost plant[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2) :201-206.
- [21] Riffaldi R, Levi M, Pera A, et al. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses [J]. *Waste Management and Research*, 1986, 4 :387-396.
- [22] Garcia C. Study on water extract of sewage sludge composts[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1991, 37(3) :399-408.
- [23] 史殿龙, 张志华, 李国学, 等. 堆高对生活垃圾中 15 mm 筛下物堆肥腐熟的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1) :324-329.
SHI Dian-long, ZHANG Zhi-hua, LI Guo-xue, et al. Effect of stacking height on maturity during composting of municipal solid waste under 0-15 mm sieved[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1) :324-329.
- [24] Castaldi P, Garau G, Melis P. Maturity assessment of compost from municipal solid waste through the study of enzyme activities and water-soluble fractions[J]. *Waste Management*, 2008, 28 :534-540.
- [25] Charest M, Antoun H, Beauchamp C. Dynamics of water soluble carbon substances and microbial populations during the composting of deinking paper sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 91 :53-67.
- [26] Sharon Z, Omer M, Jorge T. Dissolved organic carbon(DOC) as a parameter of compost maturity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 2 :2109-2116.
- [27] Cunha-Queda A, Ribeiro H, Ramos A, et al. Study of biochemical and microbiological parameters during composting of pine and eucalyptus bark [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98 :3213-3220.