

接种高温菌剂的生活垃圾好氧堆肥处理

李秀艳<sup>1 2</sup> , 吴星五<sup>2</sup> , 高廷耀<sup>2</sup> , 周群英<sup>2</sup>

( 1. 华东师范大学 环境科学与技术系 , 上海 200062 ; 2. 同济大学 城市污染控制国家工程研究中心 , 上海 200092 )

摘要 : 接种适用于 70~80 ℃ 高温环境的高效微生物菌剂 , 进行中试规模的城市生活垃圾高温好氧堆肥处理试验研究 , 为上海市某区 500 t·d<sup>-1</sup> 生活垃圾的产业化处理处置提供技术路线. 研究表明 , 接种高温菌剂的堆肥初始升温速度快 , 前 8 h 温度升高 37 ℃ , 而对照组前 13 h 堆肥温度仅升高 5 ℃ ; 接种堆肥在前 3 d 高温期温度达到 80~85 ℃ , 有机物去除质量分数 19.2% ( 前 3 d ) , 第 3 d 好气性异养细菌仍保持在 10<sup>10</sup> 数量级 ; 而对照组前 3 d 高温期的温度变化范围为 65~70 ℃ , 有机物去除质量分数为 11.9% ( 前 3 d ) , 第 3 d 好气性异养细菌降为 10<sup>9</sup> 数量级 ; 接种堆肥较对照组发酵周期明显缩短 , 一次发酵缩短 3~4 d , 二次发酵缩短了 6~7 d. 表明高温菌剂的投加 , 增强了微生物生态系统的功能 , 可以使堆肥的一次发酵阶段在高温条件下高效进行.

关键词 : 高温菌剂 ; 城市生活垃圾 ; 堆肥  
中图分类号 : X 799.3      文献标识码 : A      文章编号 : 0253-374X(2004)03-0367-05

Domestic Waste Composting with Complex Thermophilic Microbial Inoculation

LI Xiu-yan<sup>1 2</sup> , WU Xing-wu<sup>2</sup> , GAO Ting-yao<sup>2</sup> , ZHOU Qun-ying<sup>2</sup>

( 1. Department of Environmental Science and Technology , East China Normal University , Shanghai 200062 , China ;  
2. National Engineering Research Center for Urban Pollution Control , Tongji University , Shanghai 200092 , China )

**Abstract :** To effectively dispose the urban domestic wastes 500 t·d<sup>-1</sup> from some districts in Shanghai , aerobic composting operations were carried out in a moderate test scale , inoculating self-developed thermophilic bacteria which could metabolize normally under high temperatures of 70~80 ℃ , while composting without inoculation was accompanied. Results showed that the inoculation composting had a faster rise in starting temperature a rese of 37 ℃ for the first eight hours , but only a 5 ℃ rise within the first thirteen hours for the composting without inoculation. During the initial three days , the inoculation composting reached higer temperatures from 80 ℃ to 85 ℃ , decomposition extent was 19.2 percent , and viable count of aerobic heterotrophic bacteria recovered on agar plates kept 10<sup>10</sup> CFU·g<sup>-1</sup> , ( CFU abbreviation for colony forming unit ) cultured separately at 28 ℃ for the first day and at 80 ℃ for the third day. While the compared composting had a temperature variation from 65~70 ℃ during the first three days , the biodegradable extent of organic materials was 11.9 percent , and the viable count of aerobic heterotrophic bacteria recovered on agar plates decreased to 10<sup>9</sup> CFU·g<sup>-1</sup> , cultured at 70 ℃ for the third day compared with the staring count for 10<sup>10</sup> CFU·g<sup>-1</sup> at 28 ℃ culture. The inoculation composting period had been shorten by 3~4 days for the first stage and 6~7 days for the second stage compared with the noninoculation one. With the help of thermophilic bacteria inoculation , the

first stage of the composting process could be operated effectively under high temperatures of 70~80℃.

Key words :thermophilic bacteria ;urban domestic wastes ;composting

在有机固体废弃物好氧堆肥处理过程中,高效微生物菌剂的合理投加有助于增强微生物生态系统的功能,加速有机物质的分解,促进堆肥物料的腐熟,提高堆肥效率<sup>[1-4]</sup>.高温菌较常温菌具有更高的微生物代谢活性和有机物降解速率,在固体废弃物处理领域具有广阔的应用前景和科学价值<sup>[5]</sup>.

目前国内外关于高温菌剂用于有机固体废弃物堆肥处理的研究开展得比较少.

笔者以上海市某区生活垃圾为试验原料,探讨接种高温菌剂的城市生活垃圾现场堆肥技术及机理.为适宜生产化运作,研究了不添加调理剂,充分发挥高温堆肥对快速降解有机物和快速改善物料结构和透气性能的作用,在为上海市某区 500 t·d<sup>-1</sup>的垃圾处理厂提供合理的堆肥技术路线的同时,也为现代堆肥产业的发展提供了理论指导和合理的堆肥技术.

# 1 材料和方法

## 1.1 材料

表 1 上海市某区城市生活垃圾分拣结果

Tab.1 Selection result for raw materials

项目	厨类、果类等试验原料	布类皮鞋	纸类	竹木	干草	金属	搪瓷	玻璃	水泥	塑料制品	总质量
湿重/kg	607.5(含水质量分数 57.7%)	8.5	1.0	2.0	4.0	1.0	10.0	6.0	25.0	53.0	718.0
比例/%	84.6	1.2	0.1	0.3	0.6	0.1	1.4	0.8	3.5	7.4	

表 2 试验材料性质

Tab.2 Properties of experimental materials

材料	含水质量分数/%	挥发性有机物/%	pH 值	密度/(kg·L <sup>-1</sup> )
堆肥物料	57.7	78.7	6.8	0.5

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 方法

首先对原垃圾进行人工分拣、破袋,去除其中的金属、纸盒、塑料瓶、塑料袋、木块、瓷器等大块物品,剩下的有机垃圾用于堆肥试验.微生物菌剂加入的质量分数为 0.1%,不添加调理剂,加水调节堆肥原料含水质量分数为 50%左右,距堆垛底部 10 cm 处布设通气管,通过空气压缩机均匀通入空气,一次发

### 1.1.1 试验菌剂

高温复合微生物菌剂(自制),含水质量分数为 30% pH=6.5~7.5,活菌数 10<sup>9</sup> 个·g<sup>-1</sup>干重以上,无致病菌.由于微生物菌剂投加的质量分数仅为 0.1%,其有机质含量、N、P、K 等成分对堆肥及产品的影响忽略不计.

### 1.1.2 堆肥原料

上海市某区城市生活垃圾经分拣得到有机生活垃圾,分拣前垃圾组成见表 1,经人工简单分拣得到适宜堆肥的物料,主要包括蔬菜皮、菜叶、果皮、蛋皮、猪肉骨头、鱼骨头、树叶、树枝、草席等,试验原料的性质见表 2.

### 1.1.3 堆肥设施

堆肥系统由发酵系统和通风系统组成,发酵系统包括发酵槽和渗滤液收集槽,共有 8 组发酵槽,槽尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm,砖砌构筑物,槽底部有渗滤液收集槽,其上放格栅,通风系统包括鼓风机、气体流量计和配套的通风管道.8 个堆肥槽罩在一个钢架结构的塑料大棚内.

酵阶段通气量为 4 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>,二次发酵阶段通气量为 2 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>,由气体流量计控制.分别在距离堆垛底端 20、40、60 cm 处的中心部位测定温度.同时进行不接种菌剂的垃圾堆肥对照试验.视发酵温度变化情况,每隔 3~4 d 进行一次翻堆,翻堆后取样测定水分、挥发分、pH 值、有机质等.发酵过程产生的渗滤液回灌到堆肥中.

### 1.2.2 水分保持

由于进行的是高温堆肥,水分蒸发相对较大,而微生物的分解作用必须在适宜的湿度条件下进行,为保持堆肥的水分条件,试验中采取了以下措施:①发酵槽外罩以塑料大棚,减小了发酵槽内堆体温度与外围空气的温度差,因而减少了水分的蒸发;②

每天添加水分,保持堆垛含水质量分数在 50%~60%.

1.3 检测方法

含水质量分数:105℃烘至恒重<sup>[6]</sup>;灰分、挥发分:650℃灼烧至恒重<sup>[6]</sup>;有机质:重铬酸钾容量法<sup>[6]</sup>;总氮:蒸馏法<sup>[7]</sup>;全磷:钒钼黄比色法<sup>[7]</sup>;全钾:原子吸收法<sup>[7]</sup>;腐殖酸总量:焦磷酸钠浸提-重铬酸钾容量法<sup>[7]</sup>;温度:热电偶温度传感器测定;pH值:按堆肥:蒸馏水为3:10(质量g:体积ml)的比例混合后于震荡器上混匀,过滤,以pH计测定;大肠菌群:多管发酵法<sup>[6]</sup>;细菌总数:平板培养计数法<sup>[6]</sup>;蛔虫卵:饱和盐溶液漂浮法<sup>[6]</sup>.

1.4 腐熟度判别

判别堆肥腐熟程度的指标很多<sup>[8-11]</sup>,但国际上至今没有统一的标准.本研究为适应生产实际采用堆肥的表观性质、挥发分、有机质含量、温度变化等指标进行腐熟度的判别.具体如下:易降解有机物基本分解,挥发分稳定在40%左右,堆肥产品呈现疏松的团粒结构,散发泥土气味,堆层内温度降至环境温度后再次升温 $<5\text{℃}\cdot\text{d}^{-1}$ .

2 结果和讨论

2.1 过程分析

对于堆肥系统而言,温度是堆料中微生物生命活动的重要标志.堆肥过程中微生物分解垃圾中的有机物,产生高温,杀灭病原菌,并有利于物料腐熟.因此快速达到高温并维持一定时间是比较理想的状态.本研究中垃圾接种堆肥与对照组堆肥过程中距离堆垛底部40cm处温度变化情况见图1,可以明显看出堆肥过程中升温期、高温期、降温期、稳定期几个阶段的温度变化情况.升温期、高温期温度变化情况见图2.

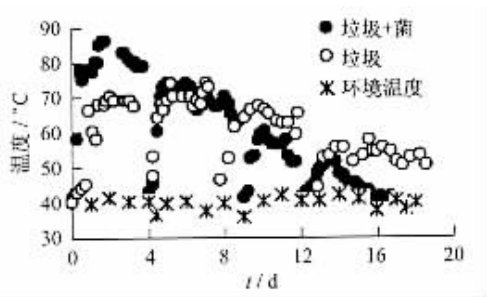


图1 垃圾+菌与垃圾温度变化曲线

Fig.1 Variation of temperature for inoculation composting and its compared one

如图2所示,接种堆肥在建堆后的前8h内,温度由初始的41℃迅速上升至78℃;而对照组在初始的13h内堆肥温度仅提高了5℃,由40℃上升至45℃.与对照组相比,接种堆肥中发酵微生物没有延滞期,8h使堆肥温度升高了37℃,升温速率平均为 $4.6\text{℃}\cdot\text{h}^{-1}$ ;而对照组在固有微生物的作用下,前13h堆肥平均升温速率仅为 $0.4\text{℃}\cdot\text{h}^{-1}$ .在以后的3d多时间内,接种堆肥温度维持在75~86℃之间,最高达到86℃,而没有投加菌剂的对照组在这段时间发酵温度低于70℃.接种堆肥与对照组平均温度相差约10℃.通过物料挥发分的测定,经过3d高温期的微生物降解作用,接种堆肥的有机物质量去除率为19.2%,对照组为11.9%.

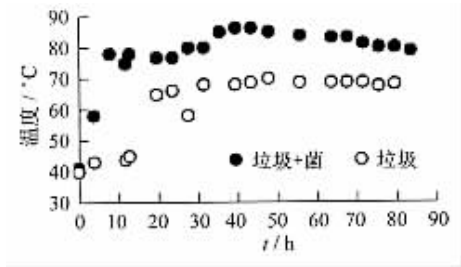


图2 升温期、高温期温度变化曲线

Fig.2 Variation of temperature for temperature rising and high temperature periods

一般文献报道,初始堆肥时堆体温度一般与环境温度相一致,经过中温菌1~2d的作用便能达到高温菌的理想温度50~65℃<sup>[12]</sup>,本试验是在夏秋季节进行的,环境温度高,塑料大棚内的温度达到 $(40\pm2)\text{℃}$ ,因此接种堆肥与对照组较资料中报道的结果都具有升温速度快、堆肥温度高的特点,而以接种堆肥优势更明显.

为使物料混合均匀,进一步改善供氧状况,在堆肥过程中进行了3次人工翻堆,翻堆后温度迅速下降,之后随着微生物代谢活动释放能量,温度回升.接种堆肥第一次翻堆后(见图1),温度回升到65~75℃温度段,较翻堆前温度平均下降了10℃多,表明易降解有机物有较大幅度的分解,微生物代谢活动产生的热值明显降低.第二次翻堆后,回升温度平均为56~57℃,温度又有明显下降,剩余的易降解有机物得到充分的分解.第三次翻堆后,平均回升温度在50℃以下,后逐渐降至室温,物料基本稳定,发酵基本结束.

对照组在初期升温缓慢,前3d的最高温度为70℃,第一次翻堆后,温度又重新回升到70℃水平,最高温度达到74℃,表明前3d微生物降解效

率低,物料仍然保持了高水平的有机物含量;第二次翻堆后温度回升到平均 65℃ 的水平,有机物有了一定程度的降解;第三次翻堆,平均温度回升到 55℃,较上一个温度段降低约 10℃,说明大部分易分解有机物已分解完成.物料挥发分变化情况见图 3.

图 3 中堆肥前 12 d 接种堆肥的有机物降解速率明显大于对照组,12 d 以后挥发分的质量分数稳定在 40%~43%,整个堆肥过程中对照组的挥发分含量大于接种堆肥组.对照组在 20~23 d 以后挥发分含量趋于稳定.表明接种高温菌剂明显加速了有机物降解速率,加快了垃圾稳定化进程.这一过程中 pH 值变化情况见图 4.

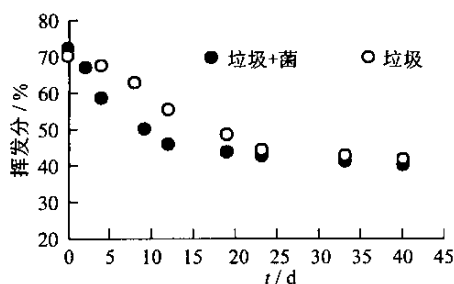


图 3 堆肥过程中有机物降解比较

Fig.3 Decomposition extent for inoculation composting and its compared one

在堆肥过程中, pH 值随堆肥时间和温度的变化而改变.初期微生物活动产生的有机酸使物料的 pH 值下降,随着过程的进行,含氮有机物产生的氨使物料的 pH 值又开始回升,最后稳定在较高的水平上.由图 4 可以看出, pH 值回升后接种堆肥的 pH 值稳定在 8.9~9.2,最高值为 9.2;而对照组的 pH 值在 8.6~9.0 之间变化,略低于试验组,说明物料腐熟程度低于试验组.

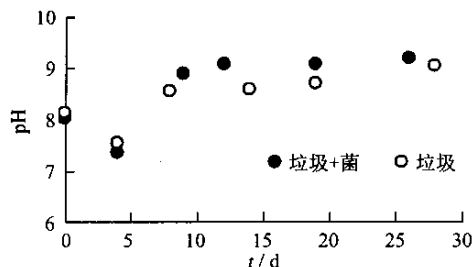


图 4 堆肥过程中 pH 值变化比较

Fig.4 pH variation for inoculation composting and its compared one

关于一次发酵、二次发酵周期的界定,没有统一的标准.一般认为微生物在初期分解消耗易降解有

机物质的过程中放出热量,使堆层温度不断升高,发酵由中温阶段进入高温阶段,并在高温范围内稳定一段时间.在这一温度范围内,病原微生物被杀死,腐殖质开始形成,堆肥物料达到初步腐熟.这一阶段为一次发酵阶段;在二次发酵阶段,由于大部分有机物在一次发酵阶段已被降解,物料不再有能量积累,堆肥温度维持在中温.这时物料进一步稳定,最后达到深度腐熟<sup>[13]</sup>.

从工程实际出发,本试验接种堆肥的一次发酵周期定为 7~9 d,这时堆肥温度已从 80℃ 温度段、70℃ 温度段降至 50~60℃ (见图 1),易降解有机物大部分分解完成,挥发分的质量分数小于 45% (见图 3).物料可以堆放贮存,以完成二次发酵.整个发酵周期可以定为 15~17 d,这时堆肥温度逐渐降至室温 (图 1),物料挥发分质量分数稳定于 40% 左右 (见图 3).同理,对照组一次发酵周期定为 11~12 d,堆肥温度从 70℃ 温度段较大幅度降为 50~60℃ (见图 1),基本完成易降解有机物质的分解 (见图 3).二次发酵结束的时间为第 22~23 d,这时温度基本降至室温,挥发分含量趋于稳定 (见图 3).

黄懿梅等的研究认为<sup>[2,12]</sup>,外源微生物的引入对堆肥温度影响不大,而对缩短堆肥腐熟时间有明显的效果.本试验表明,接种高温菌剂可使堆肥初期在 80℃ 或以上的高温环境中高效进行,有机物降解速率、物料腐熟程度明显大于对照组,同时堆肥周期明显缩短,一次发酵周期缩短了 3~4 d,二次发酵周期缩短了 6~7 d.

## 2.2 高温条件下发酵微生物数量变化

堆肥是利用异养微生物的代谢活动分解垃圾中的有机物质,传统堆肥过程主要是一个由自然微生物参与的生理生化过程,受初始微生物数量和有益菌所占比例的限制,而在人工条件下通过接种堆肥微生物,可以增加有益微生物数量,加速堆肥反应进程<sup>[14,15,14]</sup>.

为探讨接种高温菌剂后发酵微生物种群数量变化及高温杀灭致病菌的情况,分别在当天、第 3 d (高温期)、第 11 d 进行了好气性异养细菌总数、大肠菌群数量的测定,同时测定了蛔虫卵的杀灭率,取样位置在 40 cm 测温点附近.结果见表 3.

由表 3 可见,经过 3 d 的 80℃ 左右的高温,接种堆肥的好气性异养细菌总数仍然保持  $10^{10}$  数量级,而对照组锐减到  $10^9$  数量级.垃圾中固有的微生物没有耐受住 70℃ 以上高温的考验,存活率只有 2.6%,而接种微生物经受住了 80℃ 以上高温,维持

了种群数量,同时与对照组相比较保持了旺盛的代谢水平,有机物降解速率大于对照组(见图 3)。在 70℃和 80℃条件下 3 d 能有效地杀灭大肠杆菌和蛔

虫卵,大肠杆菌杀灭率在 99% 以上,蛔虫卵杀灭率为 100%。

表 3 发酵微生物数量变化及致病菌灭活情况

Tab.3 Viable counts of aerobic heterotropic bacteria and pathogens

测定项目	接种堆肥			对照组		
	当天	第 3 d	第 11 d	当天	第 3 d	第 11 d
每克干重中异养细菌总数/CFU <sup>1)</sup>	4.9×10 <sup>10</sup>	2.4×10 <sup>10</sup>	1.0×10 <sup>10</sup>	4.6×10 <sup>10</sup>	7.2×10 <sup>9</sup>	2.4×10 <sup>10</sup>
每克干重中大肠菌群数/个	6.5×10 <sup>5</sup>	2.5×10 <sup>3</sup>	3.0×10 <sup>3</sup>	6.5×10 <sup>5</sup>	5.4×10 <sup>3</sup>	8.4×10 <sup>3</sup>
大肠菌群死亡率/%		99.6	99.5		99.2	98.7
蛔虫卵杀灭率/%		100	100		100	100

1)CFU 为菌落形成单位(Colony Forming Unit)的缩写。

2.3 堆肥成品测试(见表 4)

表 4 堆肥成品测试

Tab.4 Quality of compost

	氮(全氮)/%	磷(全磷)/%	钾(全钾)/%	总腐殖酸/%	有机质/%
接种堆肥	1.75	2.22	1.63	17.98	40.42
对照组	1.61	1.49	1.36	17.05	40.35

堆肥成品呈棕褐色,结构松散、透气性强、物理性状好。接种堆肥的氮、磷、钾、腐殖酸、有机质的含量略高于对照组。同时堆肥成品的腐殖酸含量远远大于其他研究者的测定值<sup>[12]</sup>,表明高温堆肥(70℃和 80℃)有利于堆肥物料腐殖酸的形成。

3 结论

适于 70℃和 80℃高温环境的微生物菌剂的投加及在 70℃和 80℃条件下的高温堆肥的研究,目前在国内外还很少见。本研究以中试规模的试验进行这方面的探讨,并为上海市某区 500 t·d<sup>-1</sup>生活垃圾的处理提供经济可行的技术路线。研究表明接种高温发酵菌剂,不投加调理剂的工艺路线是可行的,适于工业化生产。接种高温菌剂的堆肥与对照组相比,具有升温速度快、一次发酵温度高、高温期有机物去除率高的特点。同时接种堆肥在 80℃高温环境中保持了旺盛的微生物种群数量和代谢活性,因此较对照组发酵周期明显缩短,一次发酵缩短了 3~4 d,二次发酵缩短了 6~7 d,接种堆肥的物料腐熟度大于同时期的对照组,而且高温堆肥产品腐殖酸含量高、品质好。

本研究主要探讨如何利用微生物的代谢作用快速分解、矿化垃圾中的有机组分,在生产实际中可以根据堆肥产品的不同用途,如作有机肥料、绿化营养土、覆盖土等,控制发酵周期,使物料达到不同的腐

熟度和矿化度,这一点有待于进一步探讨。

参考文献:

[1] 席北斗,李英军,刘鸿亮,等.纤维素分解菌和 EM 菌协同作用在有机废弃物堆肥中的应用[J].环境与开发,2001,16(4):16-18.

[2] 黄懿梅.两种外源微生物对鸡粪高温堆肥的影响[J].农业环境保护,2002,21(3):208-210.

[3] 沈根祥,袁大伟.Hsp 菌剂在牛粪堆肥中的试验应用[J].农业环境保护,1990,18(2):62-64.

[4] 浦一涛,钟毅沪,周万龙.固氮菌和纤维素分解菌的混合培养及其对生活垃圾降解的影响[J].环境科学与技术,1999,84(1):15-18.

[5] 薛红卫,赵树欣.高温菌及用于废物处理的研究[J].天津轻工业学院学报,2002,42(3):7-10.

[6] 俞宇馨,吴国庆,孟宪庭.环境工程微生物检验手册[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

[7] 中国科学院南京土壤研究所微生物室.土壤微生物研究法[M].北京:科学出版社,1993.

[8] 李承强,魏源送,樊耀波,等.堆肥腐熟度的研究进展[J].环境科学进展,1999,7(6):1-12.

[9] 房敏,黄焕忠,黄铭洪.评估固体废弃物堆肥腐熟和稳定的研究[J].上海环境科学,1999,18(2):91-93.

[10] 李艳霞,王敏健,王菊思.有机固体废弃物的腐熟度参数及指标[J].环境科学,1999,20(2):98-103.

[11] 李国建,钱新东.堆肥腐熟度指标的探讨[J].城市环境与城市生态,1990,3(2):27-30.

[12] 李国学,张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M].北京:化学工业出版社,2000.

[13] 周群英,高廷耀.环境工程微生物学[M].第 2 版.北京:高等教育出版社,2000.

[14] Akihiro Ohtaki,Naoki Akakura,Kiyohiko Nakasaki. Effects of temperature and inoculum on the degradability of poly-ε-caprolactone during composting[J]. Polymer Degradation and Stability,1998,62:279-284.