

添加嗜热菌促进餐厨垃圾 超高温堆肥发酵效果

付锦涛¹, 侯磊¹, 侯振华¹, 田玉聪¹, 张伟涛², 杨阳^{1*}

(1.中农创达(北京)环保科技有限公司,北京100089; 2.河北省畜牧总站,河北石家庄050035)

摘要:为促进餐厨垃圾资源化利用,以餐厨垃圾和秸秆为堆肥原料进行堆肥实验,研究嗜热菌作为堆肥发酵菌剂对好氧堆肥发酵进程的影响。结果表明,添加嗜热菌可以有效提高餐厨垃圾好氧堆肥发酵进程。菌剂处理组发酵第5 d堆肥温度最高为85℃,与对照组相比提高了21.2℃;在70℃以上维持10 d;菌剂处理组种子发芽指数在发酵第9 d达到腐熟标准。在发酵过程中,处理组随着堆体温度升高物料中的水分大量散失,发酵第14 d含水率下降到45.05%。由此可见,添加嗜热菌对餐厨垃圾好氧堆肥有一定的促进作用,是餐厨垃圾资源化处理较为理想的发酵菌剂。

关键词:嗜热菌;餐厨垃圾;超高温;腐熟

中图分类号:Q939.9

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)S2-0311-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.062

Effect of adding thermophilic bacteria to promote ultra-high temperature composting fermentation of kitchen wastes

FU Jin-tao¹, HOU Lei¹, HOU Zhen-hua¹, TIAN Yu-cong¹, ZHANG Wei-tao², YANG Yang^{1*}

(1.Zhongnong Chuangda (Beijing) Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China;

2.Hebei Provincial Animal Husbandry Station, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: In order to promote the utilization of kitchen wastes, a composting experiment is carried out with kitchen wastes and straw as raw materials to study the effect of thermophilic bacteria as composting fermentation agent on the fermentation process of aerobic composting. The results show that the added thermophilic bacteria can effectively improve the fermentation process of aerobic composting of kitchen wastes. Compared with the control group, the composting temperature of the group treated by bacterial agent reaches the highest on the 5th day of fermentation, which is 85℃, an increase of 21.2℃, and can maintain above 70℃ for 10 days. The seed germination index (GI) for the group treated by bacterial agent reaches the maturity standard on the 9th day of fermentation. During the fermentation process, with the increase of stack temperature, a large amount of water in the group treated by bacterial agent is lost, and the water content decreases to 45.05% on the 14th day of fermentation. It can be seen that the addition of thermophilic bacteria can promote the aerobic composting of kitchen wastes, and thermophilic bacteria is an ideal fermentation agent for the utilization of kitchen wastes.

Key words: thermophilic bacteria; kitchen wastes; ultra-high temperature; maturity

餐厨垃圾是一种产量大、成分复杂、易腐烂的有机废弃物。餐厨垃圾成分主要是可溶性糖、淀粉、蛋白质等有机物以及水分和无机盐^[1]。随着中国城镇化的不断发展,餐厨垃圾量急剧增长,据调查,我国餐厨垃圾的年产量约为1.2亿t,其中仅有10%的餐厨垃圾进行了资源化利用,因此餐厨垃圾实现无害化、减量化以及资源化成为关注的焦点^[2-3]。由于餐厨垃圾具有含水率高、有机质高、极易腐烂、含油量高等特点,容易滋生有害微生物并且造成环境污染^[4]。通过常规餐厨垃圾处理技术如填埋和焚

烧,不仅造成有机物的浪费,且带来严重的环境污染问题。因此高效处理厨余垃圾使其变废为宝的意义和作用日益突显,也是垃圾处理可持续发展的必然选择。

近年来,好氧堆肥处理餐厨垃圾应用较广,传统的好氧堆肥存在发酵温度低、周期长、腐殖化程度低等问题^[5]。超高温好氧堆肥技术相比于传统的好氧堆肥具有发酵周期短、发酵温度高^[6]的优点,同时可以在不依赖外源加热的条件下,使发酵温度超过80℃,抑制有害微生物生长。国内外研究表明,

收稿日期:2022-03-25;修回日期:2022-06-21

作者简介:付锦涛(1995-),女,硕士,研究方向为草学,985007623@qq.com;杨阳(1987-),男,博士,工程师,研究方向为草学,通讯联系人,cauyang@163.com。

在好氧堆肥中接种外源微生物菌剂有利于让堆肥跨越升温期,进入高温期,能够加速堆肥腐殖化,缩短发酵周期^[7-8]。

本研究以实验室自筛嗜热菌种为添加剂,通过对餐厨垃圾堆肥的温度、含水率、pH 以及种子发芽指数(GI)的测定,研究嗜热菌对餐厨垃圾的发酵效果。

1 材料与方法

1.1 材料

实验所用菌种来自实验室所筛嗜热菌;餐厨垃圾取自北京市朝阳区高安屯垃圾焚烧有限公司;秸秆购自正阳县中依草业;小白菜种子购自中国农业科学院。

发酵设备为定制江苏四联发酵罐装置,发酵罐体积为 54 L。

1.2 实验设计

餐厨垃圾和秸秆的混合物(餐厨垃圾:秸秆=3:1)含水率为 67%。实验组添加 0.2% 的嗜热菌,对照组不添加菌剂。物料混合均匀后置于四联发酵罐中。曝气方式采用底部间歇曝气,间隔 1 h,设置曝气量为 0.2 m³/h,同时进行每天翻抛物料,共发酵 14 d。

1.3 检测指标及方法

将温度计从发酵罐侧边垂直插入堆体 15~20 cm 深度,分别于上、中、下 3 个位置监测,并记录堆体温度和环境温度,堆体的温度为平均值。

含水率采用烘干法测定,分别记录铝盒质量(M_0 ,g)、烘干前样品和铝盒总质量(M_1 ,g)及烘干后样品和铝盒总质量(M_2 ,g),用式(1)计算。

$$\text{含水率}/\% =$$

$$1 - \frac{[\text{烘干后样品和铝盒总质量}(M_2) - \text{铝盒质量}(M_0)]}{[\text{烘干前样品和铝盒总质量}(M_1) - \text{铝盒质量}(M_0)]} \times 100\% \quad (1)$$

pH 测定:在 250 mL 三角瓶中加入 100 mL 无菌蒸馏水和 10 g 样品,于 220 r/min 的摇床上室温振荡 30 min,待振荡均匀后用 SX-620 型 pH 计测定。

种子发芽指数选用小白菜种子,参照国标 GB/T 23486—2009 测试。

1.4 堆肥腐熟分级

堆肥腐熟分级参考文献[9-10],将腐熟度分为 4 个等级,分别为腐熟、较好腐熟、基本腐熟、未腐熟,堆肥腐熟度分级数据见表 1。

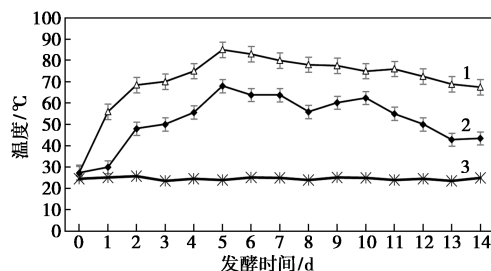
表 1 堆肥腐熟度分级数据

项目	1 级 (腐熟)	2 级腐熟 (较好腐熟)	3 级腐熟 (基本腐熟)	4 级腐熟 (未腐熟)
表观指数	颜色呈深褐色,无臭味,团粒疏松	颜色呈暗褐色,轻微臭味,团粒较疏松,部分粒径较大	颜色呈褐色,略有臭味,团粒较疏松,部分结块	颜色呈浅褐色,明显臭味,粒径较大或明显结块
发芽指数/%	≥100	100~80	80~60	60~0
50℃以上持续时间/d	>10	10~7	7~5	5~0

2 结果与分析

2.1 温度分析

堆肥温度是最直观的堆肥腐熟关键指标之一,可以直接反映堆肥的进行程度^[11]。堆肥过程的温度变化情况如图 1 所示。发酵过程中,处理组与对照组的堆肥温度变化趋势相同,呈先升高后降低的趋势。发酵前期处理组的升温速率明显快于对照组,处理组在发酵第 5 d 达到最高温度,为 85.0℃;对照组最高温度为 63.8℃,处理组比对照组最高温度提高了 21.2℃,这是由于处理组中添加了嗜热菌,优势菌群从嗜温菌转变为嗜热菌,且在发酵进程中占主导地位,使堆肥温度迅速升高,而对照组中普通微生物在 55℃ 时大部分灭活或休眠,温度难以提升^[12]。高温期持续时间如表 2 所示。处理组在 60℃ 以上高温发酵天数为 13 d,对照组在 60℃ 以上高温发酵天数为 5 d。同时,处理组在 80℃ 以上高温发酵天数达到了 3 d。堆肥后期,处理组和对照组温度均出现下降,这是由于易降解的有机质大量消耗,微生物生长代谢进程放缓。结果表明,在堆肥过程中添加嗜热菌可以有效提高堆肥前期发酵升温速度,并维持堆肥高温期持续时间。



1—处理组;2—对照组;3—环境温度

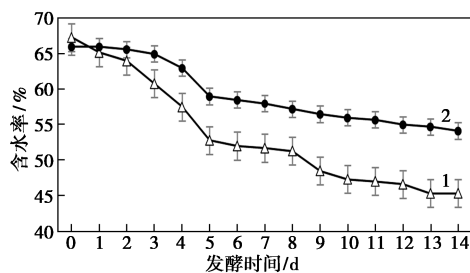
图 1 堆肥过程中温度的变化

表2 堆肥过程中发酵温度维持时间 d

温度	25~45℃	45~60℃	60~70℃	70~80℃	80℃以上
对照组	3	6	5	0	0
处理组	0	1	3	7	3

2.2 含水率分析

堆肥过程中,含水率是影响堆肥效果的重要参数,关系到好氧堆肥工艺的成败,含水率过高过低都会影响发酵质量^[13-14]。因此,适宜的含水率可以促进微生物的新陈代谢,提高堆肥发酵速率。如图2所示,处理组与对照组的初始含水率分别为67.32%、66.00%。发酵期间处理组与对照组含水率变化趋势相同,都呈逐渐下降的趋势,且处理组降低更快,发酵14 d后降低至45.05%;对照组含水率降低较慢,发酵14 d后含水率降低至54.13%。处理组和对照组含水率分别降低了22%、11.87%。结果表明,添加嗜热菌可以有效提高水分散失速率。

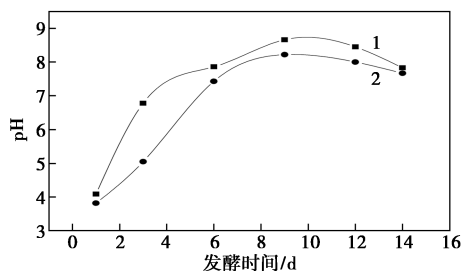


1—处理组;2—对照组

图2 堆肥过程中含水率的变化

2.3 pH 分析

pH 是一项评估堆肥环境的综合参数,pH 的变化是堆肥中有机质分解产生有机酸以及含氮有机物产生氨等共同作用的结果。堆肥过程中,微生物在高温阶段最大分解能力的 pH 通常为 7.5~8.5,pH 过高或过低会影响堆肥效果^[15]。如图3所示,处理组及对照组 pH 均呈现先升高后平稳的趋势。发酵



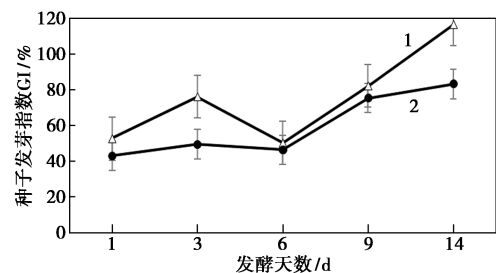
1—处理组;2—对照组

图3 好氧堆肥过程中 pH 的变化

第1 d,处理组与对照组 pH 均低于 4.5,这是由于餐厨垃圾原料 pH 较低,且在不控制环境条件下极易厌氧消化产酸^[16]。发酵过程中,通过翻抛提供微生物在新陈代谢中的需氧量,增大了微生物的活性,处理组和对照组 pH 升高,稳定在 7.7 左右,符合国标中 pH 5.5~8.5 的要求^[17]。

2.4 种子发芽指数分析

种子发芽指数是综合评价堆肥腐熟度最有效的生物学指标^[18]。一般研究表明,种子发芽指数达到 80%即可认为堆肥已腐熟^[19]。如图4所示,发酵过程中,处理组与对照组的小白菜种子发芽指数变化趋势相同,均呈现先升高后下降再升高的趋势。在发酵第6 d时种子发芽率最低,可能是由于在堆肥开始时温度迅速升高,微生物降解有机质产生了氨和有机酸等对种子萌发有毒害的物质,对种子发芽产生了一定的抑制作用,而随着后期堆肥过程的进行,有机物降解,促进了堆肥物料腐熟,从而种子发芽指数上升^[20]。发酵过程中处理组种子发芽指数均高于对照组,在发酵第9 d,处理组种子发芽指数为 82.15%,达到腐熟标准(80%),发酵第14 d,处理组种子发芽指数为 116.4%,对照组为 83.18%,符合国标中堆肥产物种子发芽指数 $\geq 70\%$ 的安全施用标准。结果表明,堆肥中添加嗜热菌可以有效提高种子发芽指数。



1—处理组;2—对照组

图4 堆肥过程中种子发芽指数的变化

2.5 堆肥腐熟分级分析

根据堆肥腐熟度分级数据,堆肥结束后对各项指标进行检测,结果见表3。处理组各项堆肥腐熟度分级指标均优于对照组,且发芽指数与 50℃ 以上持续时间达到 1 级。

表3 堆肥腐熟度分级数据

项目	堆肥产品外观	发芽指数	50℃ 以上持续时间
处理组	2 级	1 级	1 级
对照组	3 级	2 级	2 级

3 讨论

(1) 实验结果表明,餐厨垃圾堆肥中添加 0.2% 嗜热菌能够有效提高堆肥发酵效率,堆肥温度升高,加速水分蒸发速率,处理组温度在第 5 d 达到最高,同时含水率在 1~5 d 下降最快。

(2) 嗜热菌作为堆肥添加剂可以加快堆肥进程,处理组发酵第 7 d 达到国家标准中一次发酵 55℃ 以上维持时间不少于 7 d 的要求。

(3) 堆肥过程中施用嗜热菌可以有效提高堆肥腐熟度。嗜热菌处理后堆肥腐熟度分级均优于对照组。处理组种子发芽指数发酵 14 d 达到 116.4%,明显高于对照组。

(4) 发酵第 9 d 时,处理组种子发芽指数为 82.15%,符合国标中堆肥产物种子发芽指数 $\geq 70\%$ 的安全标准。

参考文献

- [1] 刘艳梅.外加生物质协同强化餐厨垃圾生物蒸发处理的机制研究[D].云南:昆明理工大学,2021.
- [2] 程昕晖,董子水,马伟芳,等.基于微生物发酵技术的餐厨垃圾资源化研究进展[J].环境科技,2021,34(6):67-70.
- [3] Xu F, Li Y, Ge X, et al. Anaerobic digestion of food waste—challenges and opportunities [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 1047-1058.
- [4] 靳晨曦,孙士强,马亚东,等.中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J].中国环境科学,2022,41(3):1240-1251.
- [5] 胡菊,秦莉,陈仪,等.VT 菌剂对鸡粪堆肥的微生物指标变化的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(S1):214-218.
- [6] 石文军,杨朝辉,肖勇,等.全程高温好氧堆肥快速降解城市生活垃圾[J].环境科学学报,2009,29(10):2126-2133.
- [7] 张羽鑫,刘闯,傅金祥,等.超高温菌好氧堆肥技术对人粪便的

处理效果[J].江苏农业科学,2021,49(4):179-185.

- [8] 唐璐,曹晓晓,和苗苗,等.好氧堆肥过程中含碳有机物演化特征研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2015,14(2):217-224.
- [9] 王敦球,潘盛.模糊综合评分法在评价堆肥腐熟度中的应用[J].农业环境科学学报,2005,24(Z1):212-215.
- [10] 郑欢,黄文久,黄凯,等.城市污泥好氧堆肥腐熟度评价指标的建立与综合评价方法[J].轻工科技,2014,30(6):124-125,155.
- [11] 岳林芳,李蕴华,薛占岭,等.不同复合菌剂对羊粪堆肥发酵处理影响比较研究[J].畜牧与饲料科学,2021,42(5):66-72.
- [12] Geoffrey D R.嗜热菌与堆肥:老技术的新见解(英文)[J].菌物研究,2015,13(4):239-243.
- [13] Tallur P N, Megadi V B, Ninnekar H Z. Biodegradation of cypermethrin by *Micrococcus* sp. strain CPN 1 [J]. *Biodegradation*, 2012, 19(1):77-82.
- [14] Liu N, Zhou J L, Han L J, et al. Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 190-199.
- [15] Zhang Y H P, Himmel M E, Mielenz J R. Outlook for cellulase improvement: Screening and selection strategies [J]. *Biotechnology Advances*, 2006, 24(5):452-481.
- [16] 王艳琴,刘月娥,赵晨曦,等.初始 pH 对餐厨垃圾高温高固率厌氧发酵产酸的影响[J].桂林理工大学学报,2016,36(3):562-566.
- [17] 何明浩,徐超,石志华,等.通风量对餐厨垃圾堆肥中氮素转化及 N₂O 释放的影响[J].宁波大学学报(理工版),2021,34(6):114-120.
- [18] 薛文涛,孙昊,刘善江,等.有机酸添加剂对低碳氮比条件堆肥氮素损失控制效果研究[J].农业环境科学学报,2022,41(5):1086-1096.
- [19] 王国英,袁京,李国学,等.堆肥种子发芽指数测定方法与敏感性种子筛选[J].农业工程学报,2021,37(19):220-227.
- [20] Zucconi F, Monaco A, Debertoldi M. Biological evaluation of compost maturity [J]. *Biocycle*, 1981, 22(4):27-29. ■

(上接第 310 页)

- [11] Van Der Veen L A, Kamer P C J, Van Leeuwen P W N M. New phosphacyclic diphosphines for rhodium-catalyzed hydroformylation [J]. *Organometallics*, 1999, 18(23):4765-4777.
- [12] Van Der Vlugt J I, Van Duren R, Batema G D, et al. Platinum complexes of rigid bidentate phosphine ligands in the hydroformylation of 1-octene [J]. *Organometallics*, 2005, 24(22):5377-5382.
- [13] Selent D, Hess D, Wiese K D, et al. New phosphorus ligands for the rhodium-catalyzed isomerization/hydroformylation of internal octenes [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2001, 40(9):1696-1698.
- [14] Yan Y J, Zhang X W, Zhang X M. A tetraphosphorus ligand for highly regioselective isomerization-hydroformylation of internal olefins [J]. *J Am Chem Soc*, 2006, 128(50):16058-16061.
- [15] Min M, Yi T, Zheng C Y, et al. Highly regioselective and active rho-

dium/bisphosphite catalytic system for isomerization-hydroformylation of 2-butene [J]. *Catalysis Letters*. 2012, 142(2):238-242.

- [16] 武陈.羰基合成反应中催化体系稳定性的研究进展[J].石油化工,2013,42(10):1179-1184.
- [17] 高国华,特木勒,殷元骥.高分子化学键联铑配合物催化剂及其均相对对应 1-己烯、乙炔氢甲酰化的对比研究[J].分子催化,1990,4(3):200-207.
- [18] 王鹏飞,胡远明,李晨,等.均相铑催化体系下 1-癸烯氢甲酰化反应研究[J].无机盐工业,2021,53(3):102-105.
- [19] 胡嵩霜,郑明芳.铑催化剂在 1-辛烯氢甲酰化反应中的应用[J].现代化工,2018,38(7):172-175.
- [20] Mi T, Li H, Wang L. Highly efficient Rh(I)/tris-H8-binaphthyl monophosphite catalysts for hydroformylation of dicyclopentadiene to dialdehydes [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2018, 39(10):1646-1652. ■