

城市生活垃圾外源微生物堆肥对有机酸变化及堆肥腐熟度的影响

魏自民^{1,3}, 席北斗¹, 赵越³, 王世平^{2*}, 许景钢³, 刘鸿亮¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100086; 3. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 利用外源微生物(美商复合菌, MS; 中加发酵菌, ZJ) 进行城市生活垃圾工厂化堆肥, 在堆肥过程中, 分析了小分子有机酸及大分子腐殖酸动态变化. 结果表明, 接种外源微生物可明显提高堆肥前期小分子有机酸含量, 在堆肥后期又呈明显的降低趋势. 而腐殖酸与胡敏酸则呈现先降低而后增加的趋势. 通过对堆肥过程中有机酸、腐殖化指数分析表明, 接种外源微生物可明显提高堆肥的腐熟度, 并且 ZJ 发酵菌优于 MS 复合菌, 而 2 种外源菌混合接种具有协同促进作用.

关键词: 城市生活垃圾; 外源微生物; 堆肥; 有机酸; 腐熟度

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)02-0376-05

Inoculating Microbes on Municipal Solid Wastes Composting Affects Organic Acids and Maturity

WEI Zimin^{1,3}, XI Beidou¹, ZHAO Yue³, WANG Shiping², XU Jinggang³, LIU Hongliang¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 2. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agriculture University, Beijing 100086, China; 3. College of Resource & Environmental, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Inoculating microbes (Meishang compound microbes, MS; Zhongjia fermentation microbes, ZJ) on municipal solid wastes composting which adopted industrialized technology was studied. The dynamic changes of low molecule weight organic acid and high molecule weight humic substance were discussed. The results show that inoculating microbes on municipal solid wastes composting could increase the content of organic acid at initial stage of composting, and decrease that at final stage. But humic substance and humic acid decline at the initial stage, then increase at the final stage of composting. The dynamic changes of organic acid and humification index indicate that inoculating microbes on municipal solid wastes can obviously increase the maturity of composting, and order as follow: MS+ ZJ> ZJ> MS> CK.

Key words: municipal solid wastes; inoculating microbes; composting; organic acids; maturity

堆肥法是城市生活垃圾处理的主要方式之一, 在堆肥过程中, 微生物利用有机物质作为能源^[1], 通过生物转化可产生大量的低分子有机酸, 并在腐熟过程中形成大量稳定的腐殖酸类物质. 一般认为, 小分子有机酸主要存在于未腐熟的堆肥中, 因此可以利用有机酸的变化来判断堆肥的腐熟度^[2~4]. 而腐殖酸含量、组成及其性质对堆肥的质量起决定性的作用. 在堆肥产品培肥土壤后, 腐殖酸类物质对土壤的理化性质及生物学特性具有十分重要的影响, 并且对作物的生长发育产生积极的作用^[5]. 目前, 对于城市生活垃圾堆肥过程中腐殖质物质化学性质的研究已有较多报道^[6~9], 但由于不同区域, 生活垃圾的成分不同, 并且大多数报道堆肥条件都是在实验室进行模拟, 其研究结果与工厂化堆肥的实际有一定的差别. 本研究为加速堆肥过程中有机物质的降解, 缩短堆肥周期, 在堆肥过程接种 2 种外源微

生物菌剂: 酵素菌和美商复合菌, 采用工厂化工艺, 探讨堆肥过程中有机酸类物质的动态变化, 为工厂化堆肥提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

城市生活垃圾: 堆肥前将塑料、金属、玻璃、纸张等可回收利用的物质进行分选后, 剩余的可降解的有机物质, C: 323.24g·kg⁻¹、N: 13.88 g·kg⁻¹、P₂O₅: 10.02g·kg⁻¹、水分: 53.56%. 试验采用的生

收稿日期: 2005-01-12; 修订日期: 2005-02-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB724203); 哈尔滨市科技攻关项目(2002AA3CN109); 东北农业大学博士基金项目(2004); 中国环境科学研究院博士后基金项目

作者简介: 魏自民(1969~), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业环境保护方向研究.

* 通讯联系人, E-mail: wang744447@163.com

活垃圾与堆肥厂内发酵堆中垃圾成分完全相同。

中加发酵菌(ZJ): 哈尔滨中加生物技术有限公司研制的发酵复合菌剂, 主要菌种为纤维素分解菌与木质素分解菌. 菌株含量: 10×10^8 个 $\cdot$ mL $^{-1}$.

美商复合菌(MS): 大庆美商国际环保公司研制的垃圾发酵专用复合菌剂, 主要菌种为干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)与克鲁斯假丝酵母(*Candida rugopelliculosa*)等. 菌株含量: 10×10^8 个 $\cdot$ mL $^{-1}$.

1.2 试验设计

试验于大庆美商垃圾堆肥厂进行, 共设 4 个处理, 3 次重复, 各处理原料及其配比见表 1, 每个处理生活垃圾 5kg, 装入透气网袋, 埋入堆肥厂发酵条形堆中, 堆长 150m, 高 2.2m. 采用二次堆肥发酵, 通风速率为 $0.11\text{m}^3 \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$, 一次发酵水分控制在 60% 左右, 大于 55°C 不少于 5d, 最高温度不超过 75°C . 二次发酵初期水分控制在 55%, 后期控制在 30% 左右. 每周翻堆 1 次, 堆肥周期为 63d.

表 1 堆肥原料及配比量

Table 1 Composting materials and composition

处理	MSW/kg	MS/mL	ZJ/mL
CK	5	0	0
MS	5	25	0
ZJ	5	0	25
MS+ ZJ	5	12.5	12.5

试验于 2003-03~ 2003-06 进行, 在堆肥过程中, 分别在 0、7、14、21、28、35、49、63 d 时将处理尼龙网袋取出通风、透气, 并采用四分法取各处理样品, 样品总量为 500g, 其中 200g 新鲜样品, 放入低温冰箱中保存, 供有机酸(挥发性、不挥发性)测定; 剩余样品风干粉碎后, 过 1mm 筛贮存, 供腐殖酸等指标测定。

1.3 有机酸等的测定方法

有机酸的提取: 参考 Thomas^[10] 等人的方法, 挥发性有机酸采用蒸馏法, 不挥发性有机酸采用中和法. 有机碳测定: 采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法. 腐殖酸采用 $0.1\text{mol NaOH} + \text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 混合液($\text{pH}=13$)提取. 胡敏酸的分离参照文献[11]. 腐殖酸碳、胡敏酸碳及富里酸碳均采用低温外热氧化-快速比色法^[12].

2 结果与讨论

2.1 城市生活垃圾堆肥过程中小分子有机酸变化

2.1.1 城市生活垃圾堆肥过程中挥发性有机酸的变化

在城市生活垃圾堆肥过程中, 挥发性有机酸含量在堆肥初期, 呈明显的增加趋势, 而在堆肥后期, 又呈明显的降低趋势(图 1). 在整个堆肥周期内, 各处理挥发性有机酸分别出现 1 个明显的峰值, 其中, CK 处理出现在堆肥的第 28d; MS、ZJ 处理则出现在第 21d; 而 MS+ ZJ 处理则出现在第 14d. 在城市生活垃圾堆肥过程中接种外源微生物, 可使挥发性有机酸含量峰值出现的时期有一定程度的提前, 与 CK 处理相比, MS、ZJ 处理挥发性有机酸出现峰值时间提前 7d, 而 MS+ ZJ 处理则提前 14d. 另外在堆肥 0~ 21d, 外源微生物堆肥处理挥发性有机酸含量明显高于不接种外源微生物处理, 而在堆肥的第 28d 以后, 则又呈明显的降低。

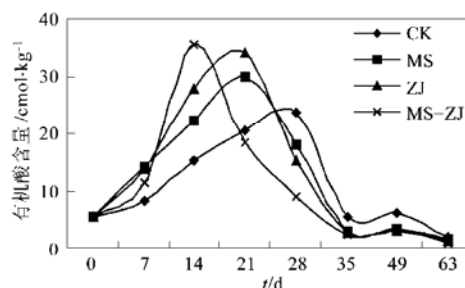


图 1 城市生活垃圾堆肥挥发性有机酸的变化

Fig. 1 Dynamic changes of volatile organic acids during the MSW composting

2.1.2 城市生活垃圾堆肥过程中不挥发性有机酸的变化

在城市生活垃圾堆肥过程中, 各处理不挥发性有机酸分别出现 2 个较为明显的峰值(图 2), 其中 CK、MS、ZJ 处理分别出现在堆肥开始后的第 14d 和 28d; 而 MS+ ZJ 处理则出现在第 7d 和第 21d, 与其它处理相比, 2 个峰值出现的时期分别提前 7d 左右。

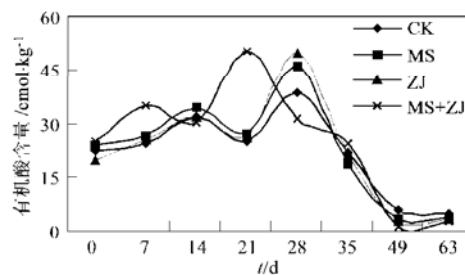


图 2 城市生活垃圾堆肥不挥发性有机酸的变化

Fig. 2 Dynamic changes of non-volatile organic acids during the MSW composting

2.1.3 城市生活垃圾堆肥过程中总有机酸的变化

在堆肥的 7~21d, 所有外源微生物堆肥处理有机酸总量明显高于不接种外源微生物处理(图 3), 而在堆肥 35~63d, 有机酸的总量又明显低于不接种外源微生物处理. 在整个堆肥周期内, 处理 CK、MS、ZJ、MS+ZJ 有机酸总量的平均值分别为 $33.01 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $35.38 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $35.80 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $35.98 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中, 外源微生物处理所产生的有机酸总量的平均含量明显高于不接种外源微生物处理, 这是由于外源微生物加入, 一方面促进了有机物质的降解, 使堆肥过程中产生的小分子有机酸数量增多; 另一方面这些接种的外源微生物在其生命活动中, 也能代谢产生一部分有机酸.

以上分析结果表明, 挥发性有机酸、不挥发性有机酸均出现了峰值, 主要是由于在堆肥的中前期, 蛋白质、脂类及糖类等小分子化合物首先被分解, 因此产生的小分子有机酸的数量较多, 而在堆肥的腐熟后期, 随着结构简单的易分解碳水化合物数量减少, 剩余的主要为纤维素、木质素等难降解的物质, 因此有机酸的生产量呈减少的趋势.

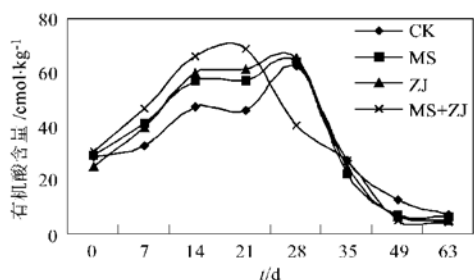


图 3 城市生活垃圾堆肥总有机酸的变化

Fig. 3 Dynamic changes of total organic acids during the MSW composting

2.2 城市生活垃圾堆肥腐殖酸含量及其组分变化

2.2.1 城市生活垃圾堆肥过程中腐殖酸含量变化

在城市生活垃圾堆肥过程中, CK 处理腐殖酸含量呈明显的降低趋势, 并在堆肥的第 49~63 d 趋于稳定(图 4), 而接种外源微生物处理在堆肥的第 0~35 d, 腐殖酸含量均呈明显的降低趋势, 并且在各时期下降幅度明显高于不接种外源微生物处理, 而 ZJ 与 MS+ZJ 处理在各时期下降幅度又明显高于 MS 处理, 各外源微生物处理在堆肥 35 d 达到最低点, 在堆肥的腐熟阶段(35~63 d), 腐殖质含量有所上升. 堆肥结束后, 处理 CK、MS、ZJ、MS+ZJ 腐殖质含量与堆肥前相比降低幅度依次为: 44.99%、41.65%、44.76%、48.68%. 与报道“固体废弃物堆

肥过程中, 腐殖质的总量处于基本不变或变化较小”^[13]不一致, 这是由于一方面不同区域城市生活垃圾成分不同, 因此在堆肥过程中物质的转化有其自身的特点; 另一方面, 在堆肥中前期, 存在较多的小分子的有机酸类物质, 在测定腐殖质过程中, 作为假腐殖质被提取出来, 随着堆肥的进行, 这些小分子的有机酸类物质逐渐被分解, 使总腐殖质的测定结果呈下降趋势; 而在堆肥的腐熟时期, 小分子的有机酸数量极少, 微生物主要利用较难降解的纤维素、木质素等物质为碳源, 在这类物质降解的同时, 逐渐形成了结构复杂的腐殖质类物质, 使腐殖质的含量有增加的趋势.

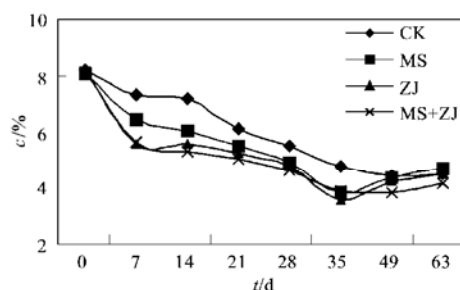


图 4 城市生活垃圾堆肥腐殖质含量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of humus during the MSW composting

2.2.2 城市生活垃圾堆肥过程中胡敏酸、富里酸含量的变化

胡敏酸与富里酸是腐殖酸的重要组成成分, 在很大程度上对腐殖质的质量起决定性作用. 在城市生活垃圾堆肥过程中, 胡敏酸的含量与腐殖质的变化有较明显的正相关性, 处理 CK、MS、ZJ、MS+ZJ 胡敏酸与腐殖质的相关系数分别为: 0.9304, 0.8841, 0.8675, 0.8629. 由图 5 可以看出, 随着生活垃圾堆肥的进行, 各处理胡敏酸的含量呈先降低, 然后增加的趋势, 各处理均在 35d 时达到最低点. 由于处理不同, 胡敏酸含量降低的幅度也不相同, 处理 CK、MS、ZJ、MS+ZJ 胡敏酸含量与堆肥前相比依次降低(与最低点相比) 36.60%、38.48%、41.07%、41.84%, 并且接种外源微生物处理, 在堆肥中前期胡敏酸含量下降幅度明显增加. 但在堆肥的腐熟时期, 随着腐殖质的形成, 胡敏酸的含量呈明显增加趋势, 相对于最低点, 处理 CK、MS、ZJ、MS+ZJ 增加幅度依次为 12.20%、30.64%、35.75%、34.84%, 对堆肥结束后各处理胡敏酸含量方差分析表明, $F = 20.67^{**}$, 这说明外源微生物堆肥可促进堆肥后期胡敏酸的形成, 但各微生物处理之间胡敏酸含量差异不显著.

在城市生活垃圾堆肥过程中, 富里酸含量的变化与胡敏酸不同, 总体呈现为逐渐降低趋势(图 6), 与堆肥前相比, 堆肥后处理 CK、MS、ZJ、MS+ZJ 富里酸降低幅度依次为: 58.89%、60.59%、64.73%、71.37%。由图 6 分析得出, 处理 CK 在整个堆肥周期内下降趋势明显, 而外源微生物各处理富里酸含量明显出现 2 个快速下降期, 分别为 0~14d、28~35d, 2 个较为平稳时期, 分别为 14~28d、35~63d; 在 0~14d 内, ZJ、ZJ+MS 处理富里酸的降低速度较快, 表明 ZJ 发酵菌剂及其与 MS 复合菌混合接种在堆肥前期可促进富里酸的转化。

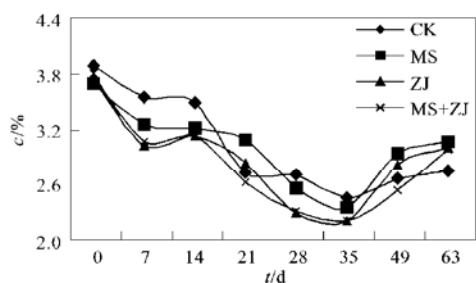


图 5 城市生活垃圾堆肥胡敏酸含量动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of humic acid during the MSW composting

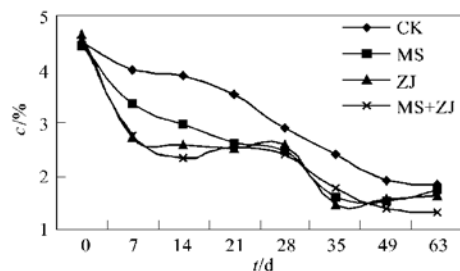


图 6 城市生活垃圾堆肥富里酸含量动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of fulvic acid during the MSW composting

2.3 城市生活垃圾外源微生物堆肥对腐熟度影响

2.3.1 胡敏酸与富里酸的比值(HI)对堆肥腐熟度的影响

通常情况下, 城市生活垃圾堆肥的腐殖化程度, 可以用腐殖化指数 HI(humification index, HI) 来进行判断. $HI = HA/FA$.

在城市生活垃圾堆肥过程中, 各处理 HI 值总体呈增加的趋势(图 7), 在 0~28d 内, 出现较小的一个峰值, 这主要是由于在堆肥的前期, 胡敏酸与富里酸均呈现不同程度的矿化, 在 14~28d, 胡敏酸通

过矿化可能形成一部分富里酸, 使富里酸的矿化趋于平稳(图 6), 因此 HI 值出现了一定程度的波动. 而在 28~63d, 呈现明显上升的趋势, 堆肥结束时, 各外源微生物处理 HI 值均明显高于不加外源微生物处理, HI 多重比较达极显著水平 ($F = 42.99^{**}$), 其中 MS 复合菌与 ZJ 复合菌处理之间差异不显著, 而二者同时接种于城市生活垃圾堆肥过程中, 与其它处理相比, 达极显著水平. 根据报道^[13], 堆肥过程 HI 值达到 1.4 以上, 就可以判断堆肥已基本腐熟, 在堆肥的第 35 d, 所有外源微生物处理 HI 值均达到 1.4 以上, 而不接种外源微生物处理第 49 d 才接近 1.4. 说明外源微生物处理可使堆肥周期缩短 2 周左右. 至堆肥结束后, 各处理 HI 值分别为 CK, 1.49; MS, 1.75; ZJ, 1.83; MS+ZJ, 2.29. 以上结果分析表明, 在城市生活垃圾堆肥过程中, 接种外源微生物菌有利于腐殖化程度增加, 并且 ZJ 发酵菌优于 MS 复合菌, 而 2 种外源菌混合接种具有协同促进作用.

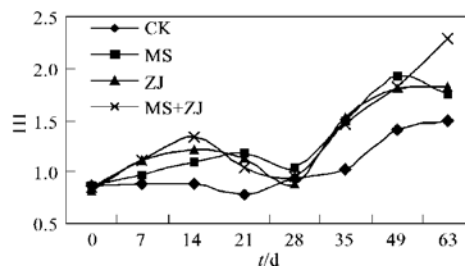


图 7 城市生活垃圾堆肥 HI 值的动态变化

Fig. 7 Dynamic changes of HI during the MSW composting

2.3.2 小分子有机酸对堆肥腐熟度的影响

有机酸含量可以用来判断城市生活垃圾堆肥的腐熟度, 一般情况下, 未腐熟的堆肥含有较多的有机酸, 而腐熟的有机酸含量极少. 因此, 通过各处理堆肥腐熟阶段总有机酸含量的比较可以看出, 外源微生物处理在堆肥后期, 其有机酸总量明显降低, 并且在堆肥第 49d 有机酸总量基本处理于稳定, 而不接种外源微生物处理在第 63d 还保持下降的趋势. 因此以有机酸的变化来判断, 外源微生物堆肥可至少使堆肥周期提前 14d.

3 结论

(1) 在堆肥过程中, 挥发性有机酸出现 1 个较为明显的峰值, 而不挥发性有机酸则出现 2 个峰值, 其中接种外源微生物处理能明显提高堆肥前期的有机

酸含量,而在堆肥后期又促进了有机酸含量的降低.

(2)堆肥过程中,腐殖酸与胡敏酸呈较好的相关性,均呈现先降低而后增加的态势.通过对有机酸总量及 HI 值比较表明,接种外源微生物可明显提高堆肥的腐熟度,并且 ZJ 发酵菌优于 MS 菌,而 2 种外源菌剂混合接种具有协同促进作用.

参考文献:

- [1] Chefetz B, Hadar Y, Chen Y. Dissolved organic carbon fractions formed during composting of municipal solid waste: properties and significance[J]. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 1998, **26** (3): 172~ 179.
- [2] Makenga R Bazira, Simard R R. Low molecular weight aliphatic acid contents of composted manures[J]. *J. Environ. Qual.*, 1998, **27**(3): 557~ 561.
- [3] William F. Brinton. Volatile organic acids in compost: Production and odorant aspects [J]. *Compost Science & Utilization*, 1998, **6**(1): 75~ 82.
- [4] De Vleeschauwer D, Verdonck O, Van Assche P. Phytotoxicity of refuse compost[J]. *Biocycle*, 1981, **22**(1): 44~ 46.
- [5] Chen Y, Aviad T. Effects of humic substances on plant growth [A]. In: MacCarthy P, Clapp C E, Malcolm R L, Bloom P R (eds): *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected readings. Proceedings of a symposium cosponsored by the International Humic Substances Society [C].* Chicago, IL, 1990, 161~ 186.
- [6] Aoyama M. Properties of fine and water-soluble fractions of several composts [J]. *Soil Sci. Plant Nut.*, 1991, **37**(4): 629 ~ 637.
- [7] 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**(4): 776~ 785.
- [8] Ciavatta C, Govi M, Pasotti L, *et al.* Changes in organic matter during stabilization of compost from municipal solid waste [J]. *Bioresource Tech.*, 1993, **43**: 141~ 145.
- [9] Jimenez E I, Garcia V P. Determination of maturity indices for city refuse composts[J]. *Agric. Ecosystems Environ.*, 1992, **38**: 331~ 343.
- [10] Wang T S C, Cheng S Y, Helen Tung. Extraction and analysis of soil organic acids[J]. *Soil Science*, 1967, **103**(5): 360~ 366.
- [11] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.