

文章编号: 1000-5013(2011)05-0546-05

污泥二步法静态好氧堆肥发酵工艺

许文江¹, 刘美龄², 谢小青², 戴兰华²,
余淑蓉², 黄明强³, 张雪芹⁴, 陈志峰⁵

(1. 福建省亚热带植物研究所, 福建 厦门 361006; 2. 厦门水务集团有限公司, 福建 厦门 361006;
3. 厦门大学 嘉庚学院, 福建 漳州 363105; 4. 福建省亚热带植物生理生化重点实验室, 福建 厦门 361006;
5. 福建省农业科学院 果树研究所, 福建 福州 350003)

摘要: 提出二步法好氧静态堆肥发酵工艺, 其采用简易的恒温仓式反应器, 好氧堆肥的前期通气量较少, 中、后期通气量较多. 研究结果表明: 一步好氧堆肥的腐熟菌剂 LA502 的最适生长温度是 55 ℃, 二步好氧堆肥的腐熟菌剂 L501 的最适生长温度是 60 ℃; 试验中的两次堆肥温度充分覆盖了多种高温腐熟微生物的生长温度范围, 并可根据底物腐熟过程的全碳变化、温度变化、种子发芽率指数实时调整通气量.

关键词: 污泥; 二步堆肥; 腐熟菌剂; 生长温度; 恒温仓式反应器

中图分类号: X 799.305

文献标志码: A

随着我国农村城市化及城市规模扩大, 每年产生的生活污水不断增多, 而将生活污水转化为肥料, 既绿色环保又能资源循环利用^[1-8]. 传统的条垛污泥堆肥法一般利用原料中的土著微生物在常温下降解有机物, 但处理量少、腐熟时间较长(约 30~40 d)、容易造成二次污染. 有研究认为, 采用好氧高温堆肥工艺及人工加入腐熟微生物菌剂可以调节堆肥生产中的菌群结构, 缩短发酵周期并减少二次污染. 国内文献显示, 多个机构已完成了堆肥接种剂的筛选、驯化与优化组合, 并实现了从原菌到年产千吨商品菌的生产规模. 堆肥控制工艺有强制通风静态垛好氧堆肥系统、隧道发酵等技术. 国外研究堆肥工艺比较早, 主要有发酵池式、仓式、隧道式等装置式堆肥, 通风工艺有 Beltsville, Rutgers, Leeds 和混合通风控制方式^[9-19]. 目前, 国内污泥肥料化处置大多采用集中堆肥, 集中堆肥方式比较适合大城市的大型污水处理厂, 而适合中小型污水处理厂的污泥就地肥料化技术尚未见详细的研究报道^[6-8]. 因此, 探索一种合适的污泥堆肥工艺, 对我国几千个中小城市的污水处理具有重要的现实意义. 本文提出通风、控温等二步法发酵堆肥技术, 并探索污泥快速腐熟技术在中小型污水处理厂、畜牧养殖厂的运用.

1 实验部分

1.1 菌种

腐熟菌剂 L501 为福建省农业科学院、福建省亚热带植物研究所采集保藏, 主要由芽孢杆菌属、高温放线菌属和高温单孢菌属等 18 种微生物菌株构成. 腐熟菌剂 LA502 来自厦门绿标生物科技公司, 主要由细菌等 16 种微生物菌株构成, 从实验中的污泥和菇土中筛选、驯化、优化组合而成.

1.2 培养基

牛肉膏蛋白胨培养基, 改良高氏一号培养基, 马丁氏培养基, 细菌、真菌、放线菌的淀粉水解试验、明胶水解试验、纤维素酶活性测定的培养基及其计数培养基^[20-22].

1.3 堆肥材料

堆肥原料由污泥与菇土按质量比 13 : 7 配成, 其中全碳占 41%、水分占 60%、C/N 值为 27~33. 生

收稿日期: 2011-04-26

通信作者: 许文江(1967-), 男, 副研究员, 主要从事有机肥料的研究. E-mail: xump@163.com.

基金项目: 国家“水专项”(2009ZX07317-003-02); 福建省厦门市科技计划重点项目(3502Z20092002)

活污泥来自福建厦门石渭头污水处理厂,水分占 59%~81%、全碳占 52%(干基)、全氮占 1.9%(干基);菇土来自福建厦门绿标生物科技公司(食用菌培养基下脚料添加适量烟叶渣等调理剂),水分占 21%~29%、全碳占 30%~39%(干基)、全氮占 1.1%(干基).

1.4 仪器与设备

WDP 微生物多用培养箱、智能光照培养箱、细菌计数器、菌落计数器和塑料浅盘等. 仓式堆肥反应器长 4.6 m、宽 2.0 m、高 2.1 m,配置风量 $21\text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 的热风机(常温至 90 ℃)及时间继电器. 其中底部 0.2 m 高作为鼓气、气流缓冲、导污层,以使风流均匀地通过通风孔道进入堆肥仓,并可收集渗滤液将其排出;仓壁用保温板制成,并做防腐保护,持续使用 2 a 仍完好;1 个反应器设备投资约 2 万元,10 个反应器的堆肥车间占地约 200 m²,年处理污泥约 1 500 t.

1.5 试验过程

试验从 2009 年 2 月至 2010 年 11 月持续进行,使用仓式堆肥反应器,采用二步法静态发酵堆肥、强制通风及控温的工艺方式. 一步发酵堆肥时,加入质量分数为 10%的腐熟菌剂 LA502;二步发酵堆肥时,加入质量分数为 10%的腐熟菌剂 L501. 由热风机、温度控制仪、时间继电器控制发酵堆肥的温度、通风量. 在各测温点分别取等量样品进行混匀,样品分成 2 份,一份为鲜样,贮存在 4 ℃冰箱中,用于含水率的测定及菌悬液制备等,另一份样品风干贮存备用.

1.6 测定方法

1.6.1 菌量 在一定的培养时间下,准确移取样品,用显微镜直接计数法、平板菌落计数法分别测定细菌、放线菌和真菌数量及其总菌数^[20-21],测定菌量,计算式为

$$M = AV/B.$$

式中: M 为菌量, $\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,菌落形成单位(colony-forming unit,CFU)指,将稀释后的一定量的菌液通过浇注或涂布的方法,让其内的微生物单细胞——分散在琼脂平板上,待培养后,每一活细胞就形成一个菌落; A 为每毫升菌悬液中的菌量, $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$; B 为取料量,g; V 为加入无菌水的量,mL.

1.6.2 全碳和全氮 用重铬酸钾容量法测定全碳,用半微量凯氏定氮法测定全氮^[22].

1.6.3 种子发芽率指数(GI)^[6] 采用黄瓜种子(中科 968)测定种子发芽率指数.

1.7 统计分析方法

用 DPS 软件进行差异的统计学分析. 其中: $P<0.05$ 为差异有统计学意义,用小写字母表示,如 a 与 b 是差异有统计学意义; $P<0.01$ 表示差异极有统计学意义,用大写字母表示,如 AB 与 A 比较,它们有相同的 A,差异“不”极有统计学意义;A 与 BC 比较,它们没有相同的字母,差异极有统计学意义.

2 结果与分析

国内外研究报道表明,好氧堆肥理想的温度范围是 52~60 ℃. 影响堆肥过程中堆体温度的因素,主要有堆肥原料、水分含量、有机质含量、pH 值、C/N 值、通气量、容重、孔隙和环境温度变化率等. 而且,固体热导性差,在产热高峰,堆体温度急剧上升,容易出现温度梯度. 研究表明,反应器良好的温度监测和控制可提高堆肥的成功率和堆肥产品的质量^[23-26]. 因此,本试验的仓式堆肥反应器采用空气对流的散热作用来平衡微生物代谢活动产热的累积.

2.1 一步发酵堆肥的最佳温度和 pH 值

温度影响微生物的生长、生存,只有在合适的温度下,微生物腐熟菌剂才能有较强的分解有机物的作用. 将堆肥原料分别在不同培养温度(θ)下进行一步仓式静态堆肥,75 h 后准确移取样品,每个处理 6 次重复,结果如表 1 所示. 表 1 中: $\lg M$ 为菌量的对数值; σ 为标准差.

从表 1 的数据可知,不同的温度对腐熟菌剂 LA502 生长的影响差异极显著. 在 52~58 ℃之间,菌体增殖都较快,总菌数为 $1.4 \times 10^7 \sim 2.1 \times 10^7$

表 1 一步发酵堆肥的菌量与温度的关系

Tab.1 Relationship between the biomass and the temperature of the first-step compost

| $\theta/^\circ\text{C}$ | $\lg M$ | σ | 差异统计学意义 | |
|-------------------------|---------|----------|---------------|---------------|
| | | | $\alpha=0.05$ | $\alpha=0.01$ |
| 50 | 6.88 | 0.03 | b | C |
| 52 | 7.16 | 0.06 | a | AB |
| 55 | 7.32 | 0.08 | a | A |
| 58 | 7.17 | 0.05 | a | AB |
| 60 | 6.90 | 0.10 | b | BC |

个 $\cdot\text{g}^{-1}$,而底物全碳降为 34%~36%.由此可确定该菌群的最适生长温度是 55℃.

在 55℃下,调节不同的原料 pH 值进行一步仓式静态堆肥,71 h 后准确移取样品,每个处理 6 次重复,结果如表 2 所示.表 2 中:lg M 为菌量的对数值; σ 为标准差.表 2 数据表明:腐熟菌剂 LA502 在 pH 值为 7~8 之间均可生长,在 pH 值为 7.7 时菌数最多,达到 2.6×10^7 个 $\cdot\text{g}^{-1}$;在 pH 值为 8.5 以上和 pH 值为 6 以下时,该菌群生长较差,菌数明显较少,菌体增殖、碳消耗都较慢.

图 1 是腐熟菌剂 LA502 的生长曲线.图 1 中:10~43 h 为对数生长期,45~71 h 为平衡期,71 h 后进入衰退期.在对数生长期、平衡期,细菌约占总数的 82%,放线菌占总数的 15%,真菌生长缓慢.

2.2 二步发酵堆肥的最佳温度

将 pH 值为 7.7 的堆肥原料,在 55℃下进行一步仓式静态堆肥,71 h 后将堆肥原料完全翻料,继续在含水率 50%,不同温度下进行二步仓式静态堆肥,65 h 后准确移取样品,腐熟菌剂 L501 生长温度的测定如图 2 所示.

实验结果表明,腐熟菌剂 L501 在 58~63℃之间,菌体增殖都较快,总菌数为 $2.3\times 10^7\sim 2.6\times 10^7$ 个 $\cdot\text{g}^{-1}$,放线菌、真菌也较好地生长;底物全碳降为 29%~31%.由此可确定腐熟菌剂 L501 的最适生长温度是 60℃.腐熟菌剂 L501 的生长曲线与腐熟菌剂 LA502 的生长曲线类似,10~42 h 为对数生长期,42~65 h 为平衡期,65 h 后进入衰退期.

表 2 一步发酵堆肥的菌量与 pH 值的关系

Tab. 2 Relationship between the biomass and the pH of the first-step compost

| pH | lg M | σ | 差异统计学意义 | |
|-----|------|----------|---------------|---------------|
| | | | $\alpha=0.05$ | $\alpha=0.01$ |
| 6.0 | 6.52 | 0.09 | d | E |
| 6.5 | 6.86 | 0.04 | c | D |
| 7.0 | 7.12 | 0.08 | b | BC |
| 7.5 | 7.26 | 0.06 | ab | AB |
| 7.7 | 7.41 | 0.06 | a | A |
| 8.0 | 7.21 | 0.07 | b | AB |
| 8.5 | 6.91 | 0.04 | c | CD |

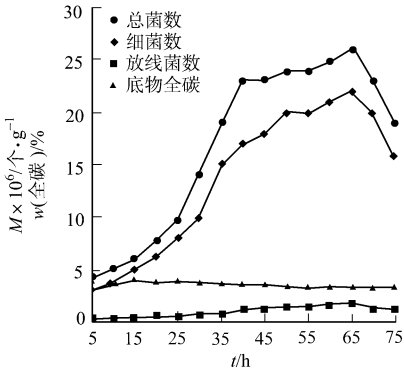


图 1 腐熟剂 LA502 腐熟过程的生长曲线
Fig. 1 Growth curve in rotten process of rotten microbial inocula LA502

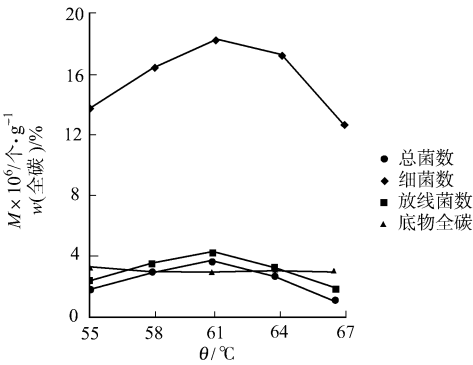


图 2 腐熟剂 L501 腐熟效果与温度的关系
Fig. 2 Relationship between the rotten effect of rotten microbial inocula L501 and the temperature

腐熟菌剂 L501 中的细菌、放线菌和真菌等微生物近 16 种高温菌株,是从堆肥生产中的原生菌群、商品腐熟菌剂中筛选、培育得到的,总菌数为 6.0×10^7 个 $\cdot\text{g}^{-1}$,细菌占 60%,放线菌占 20%,真菌占 20%.腐熟菌剂 L501 中的腐败梭状芽孢杆菌对污泥中的蛋白质分解起着重要的作用,嗜热脂肪芽孢杆菌、黑曲霉对淀粉的水解是在其分泌的淀粉酶催化进行的^[20-22].可见,腐熟菌剂必须由多菌株或菌类组成,它们必须相互配合、协同作用,才能达到腐熟效果.

2.3 二步法静态发酵堆肥的最佳通气量

条垛好氧堆肥体积较大,堆肥的温度、含氧量比较不好控制,为此,该试验的堆肥反应器体积设计适中,能够让空气与原料均匀充分地接触.将 pH 值为 7.7 的堆肥原料,在 55℃下进行一步仓式静态堆肥,进行循环吹风(适时热风)和停吹风;然后,在 71 h 将堆肥原料完全翻料,在 60℃下进行二步仓式静态堆肥,在 71~136 h 时间段循环吹风(适时热风)和停吹风.根据底物腐熟过程全碳变化、温度变化、种子发芽率指数确定其最佳通气量.

在 0~24 h,堆肥菌株调整期需氧量较少,通气 3 min,停止 25 min,堆体不需要热空气就可以升温到 55℃,其升温曲线与条垛好氧堆肥相同;在 24~71 h,堆肥菌株在对数生长期、平衡期需氧量较多,通

气 2.5 min, 停止 12 min, 一般情况下只须调整通气时间就可以控制温度在 55 ℃ 左右. 实验结果表明: 一次腐熟 71 h 后, 堆肥的全碳、H₂O 质量分数为 35%, 43%, 种子发芽率指数(GI)为 67%. 由实验可见, 一步堆肥过程的温度曲线与条垛好氧堆肥相似.

试验的二步堆肥工艺设计是基于条垛好氧堆肥的温度曲线与菌株生长条件修正的. 在 71~113 h, 是腐熟菌剂 L501 为主进行的二步堆肥期, 此时水溶性有机碳等营养成分减少了, 腐熟产生的热能也不足维持底物腐熟温度 60 ℃, 需要少量的热空气, 通气 3 min, 停止 15 min. 实验结果表明: 二次腐熟 136 h 后, 堆肥的全碳、H₂O 质量分数为 31%, 19%, 种子发芽率指数(GI)为 82%. 在堆肥后期, 微生物代谢活动减慢, 该仓式堆肥反应器要通过热空气的加热作用使得堆体温度基本恒定, 但也必须考虑空气对流对水分蒸发的影响, 防止水分过度损失.

3 讨论

目前, 国内外报道缩短堆肥发酵时间的研究, 大多在大型好氧条垛、隧道发酵中添加菌剂和倒仓处理方面; 倒仓处理可促进原料与空气接触, 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. 可见, 好氧堆肥过程的一个关键工艺是如何使优良腐熟菌剂及原料能与空气充分接触^[7-10].

因此, 文中初步提出二步法静态堆肥发酵工艺, 即一步发酵堆肥温度 55 ℃, 二步发酵堆肥温度 60 ℃. 试验中的两次堆肥温度充分覆盖了多种高温腐熟微生物的生长温度范围, 又实时根据底物腐熟过程的全碳变化、温度变化、种子发芽率指数调整其通气量. 从而, 总结了一种投资少、工艺简易、发酵周期短、占地少的污泥就地堆肥工艺. 将进一步试验在堆肥反应器中增加搅拌设备, 让原料与空气能充分接触, 使得温度、湿度等各种工艺参数更加容易控制, 以便实现动态堆肥^[27-28].

福建省农业科学院翁伯琦、林新坚、杨道富老师对本研究给予指导, 特此致谢.

参考文献:

- [1] 刘波, 朱昌雄. 微生物发酵床零污染养猪技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
- [2] 牛俊玲, 崔宗均, 秦莉, 等. 不同培养条件对堆肥中降解纤维素林丹复合菌系分解能力的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 235-240.
- [3] 陈济琛, 任香芸, 蔡海松, 等. 嗜热脂肪土芽孢杆菌 CHB1 固体发酵工艺[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2478-2483.
- [4] 胡宏友, 卢昌义, 叶勇, 等. 灌溉对凤仙花植物-土壤系统影响的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(4): 584-588.
- [5] 林代炎, 杨箐, 叶茂锋, 等. 福建省城市污泥处置现状及其农业利用成效分析[J]. 福建农业学报, 2005, 20(增刊): 139-143.
- [6] 张隲利, 刘青, 徐智, 等. 复合微生物菌剂对污泥堆肥的作用效果研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(2): 266-269.
- [7] 王艳, 沈春红, 李国学, 等. 倒仓破碎对缩短发酵周期后生活垃圾堆肥腐熟度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 1053-1059.
- [8] 陈同斌, 郑玉琪, 高定, 等. 猪粪好氧堆制不同阶段氧气含量变化特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2179-2183.
- [9] PETIOT C, DE GUARDIA A. Composting in a laboratory reactor: A review[J]. Compost Science & Utilization, 2004, 12(1): 69-79.
- [10] MASON I G, MILKE M W. Physical modeling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems [J]. Waste Management, 2005, 25(5): 481-500.
- [11] 王立群, 张晓东, 吴邵萍, 等. 禽粪好氧堆肥发酵高温阶段微生物的分离及其作用[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(2): 204-206.
- [12] 姚良同, 李俊. 玉米秸秆低温快速腐熟菌的筛选、鉴定及效果试验[J]. 山东农业科学, 2008(3): 85-87.
- [13] 许修宏, 刘颜平, 王博, 等. 堆肥隧道式后发酵技术及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 297-300.
- [14] 吴银宝, 汪植三, 廖新梯, 等. 猪粪堆肥腐熟指标的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 189-193.
- [15] BARI Q H, KOENIG A. Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste[J]. Resour Cons Recyc, 2001, 33(2): 93-111.

[16] WILSHUSENA J H,HETTIARATCHI J P A,VISSCHERB A D,et al. Methane oxidation and formation of EPS in compost: Effect of oxygen concentration[J]. Environ Poll,2004,129(2):305-314.

[17] KAPETAMOPS E G,LOIZIDU M,VAKANAS G. Compost production from Greek domestic refuse[J]. Bioresour Technol,1993,44(1):13-16.

[18] WANG P, CHANGA C M, WATSON M E,et al. Maturity indices for composted dairy and pig manures[J]. Soil Biology and Biochemistry,2004,36(5):767-776.

[19] MONDINI C,DELL'ABATE M T,LEITA L,et al. An integrated chemical, thermal, and microbiological approach to compost stability evaluation[J]. Journal of Environmental Quality,2003,32(6):2379-2386.

[20] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京:农业出版社,1986.

[21] 无锡轻工业学院. 微生物学[M]. 北京:轻工业出版社,1987.

[22] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京:农业出版社,1984.

[23] KELLEHER B P,LEAHY J J,HENIHAN A M,et al. Advances in poultry litter disposal technology: A review [J]. Bioresource Technology,2002,83(1):27-36.

[24] AGNEW J M, LEONARD J J. The physical properties of compost[J]. Compost Science & Utilization,2003,11(3):238.

[25] FANG M,WONG M H,WONG J W C. Digestion activity of thermophilic bacterial isolated from ash-amended sewage sludge compost[J]. Water, Air, and Soil Pollution,2001,126(1/2):1-12.

[26] WAKASE S,SASAKI H,ITOH K. Investigation of the microbial community in a microbiological additive used in a manure composting process[J]. Bioresource Technology,2008,99(7):2687-2693.

[27] 朱春杰,方柏山. 微生物转化法生产 1,3-丙二醇的研究进展[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(5):481-486.

[28] 施腾鑫,贺淹才,刘嘉,等. 黏质沙雷氏菌产几丁质酶二步发酵工艺的优化[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(1):67-71.

Optimization of the Technology of Two-Step
Static Aerobic Compost of Sludge

XU Wen-jiang¹, LIU Mei-ling², XIE Xiao-qing²,
DAI Lan-hua², YU Shu-rong², HUANG Ming-qiang³,
ZHANG Xue-qin⁴, CHEN Zhi-feng⁵

- (1. Fujian Institute of Subtropical Botany, Xiamen 361006, China;
2. Xiamen Water Group Co. Ltd., Xiamen 361006, China;
3. Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105, China;
4. Fujian Key Laboratory of Physiology and Biochemistry for Subtropical Plant, Xiamen 361006, China;
5. Institute of Fruit, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The two-step composting technology was proposed in this paper. This technology used a simple constant temperature storage reactor, and the ventilation volume in earlier stage of aerobic compost was less than that in medium or later stage. Results showed that the optimal growth temperatures for rotten microbial inoculants in one-step aerobic compost (LA502) and two-step aerobic compost (L501) were 55 ℃ and 60 ℃ respectively. The composting temperatures in the above tests fully covered a variety of high-temperature rotten microbial growth temperature, and the ventilation volume could be adjusted in real time according to the carbon change, temperature change and the seed germination rate index in the rotten process of the substrate.

Keywords: sewage sludge; two-step composting technology; rotten microbial inoculants; growth temperature; constant temperature storage reactor