

# 不同环境因子对海州香薷堆肥品质与物质转化研究<sup>①</sup>

李 宁<sup>1,2</sup>, 吴龙华<sup>1</sup>, 李法云<sup>2</sup>, 骆永明<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008; 2 辽宁大学资源与环境科学学院, 沈阳 110036)

**摘 要:** 以海州香薷为堆肥原料, 采用纤维素分解菌和 effective microorganisms (EM 菌) 为接种菌剂, 对不同的微生物组合、不同环境因子 (温度、湿度) 的联合堆肥进行了实验室阶段的研究。结果表明, 在堆肥制作过程中, 各处理含水率明显下降; 全 C 呈明显的下降趋势, 全 N 则呈明显的增加趋势, 以纤维素分解菌和 EM 菌的混合菌剂对堆肥品质影响最为显著, 使其 C/N 下降到 17.9。而在室温、含水率为 75% 条件下, 堆肥的品质最佳, 其 C/N 值为 13.7,  $\eta_{CN}$  为 60.8%, 达到有机肥料一级腐熟标准。同时, 整个堆肥过程中纤维素分解菌始终保持旺盛的活性, 其菌群密度保持在  $2.79 \times 10^6$  CFU/g 干重左右。通过纤维素分解菌和 EM 菌的协同作用, 能够快速高效地降解海州香薷残体。

**关键词:** 纤维素分解菌; EM 菌; 堆肥; 海州香薷

**中图分类号:** S147

海州香薷是我国长江中下游地区废铜矿上常见的优势植物, 对 Cu 有较高的耐性和强蓄积能力, 因而作为一种修复植物, 被广泛应用于重金属污染土壤生物修复领域。海州香薷植物体主要由纤维素、半纤维素、木质素构成, 三者所占的比例分别为 40%, 20%~30% 和 20%~30%<sup>[1]</sup>, 其 C/N 比较高, 难腐熟, 但通过微生物代谢的多种酶的协同作用, 可以将纤维素等大分子分解成葡萄糖等小分子化合物<sup>[2]</sup>。因此, 在堆肥中接种多种能够产生纤维素酶的复合菌群将有利于植物体快速腐熟分解, 并形成品质优良的有机肥料。目前纤维素、半纤维素原料发酵包括高温好氧、高温厌氧、好氧与厌氧相结合的发酵工艺。其采用的微生物种类也很多, 包括细菌、真菌、放线菌等, 各种微生物的处理效果也不尽相同<sup>[1, 3]</sup>。本文以海州香薷为堆肥原料, 进行不同微生物组合, 不同温度、湿度条件下接种微生物菌剂的联合堆肥试验, 旨在实现植物修复体系的整个循环产业链, 使修复植物变废为宝, 探索其制备含 Cu 有机肥料的可行性、确定最适堆腐条件和最佳堆肥品质。综合国内外研究, 利用植物体生产有机肥料, 对解决有机肥料缺乏和保护环境起到积极作用, 具有广阔发展前景。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

海州香薷采自浙江省某地, 将植物体烘干粉碎至

1~2 cm, 待用。试验用海州香薷含水率 34.2%, 全 C 550 g/kg, 全 N 9.30 g/kg, 全 P 2.40 g/kg, 全 K 6.00 g/kg, 全 Cu 430 mg/kg, 全 Zn 737 mg/kg。

### 1.2 供试微生物

纤维素分解菌和 effective microorganisms (EM 菌) 分别由中国科学院南京土壤研究所和爱睦乐环保生物技术 (南京) 有限公司提供。

### 1.3 供试菌剂

(1) 扩大培养: 培养基成分为  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.50 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.25 g, 明胶 2.00 g, 羧甲基纤维素钠 1.88 g, 蒸馏水 1000 ml, pH 值 7.0。

(2) 检验培养: 上述菌剂另加刚果红 0.20 g, 琼脂 14.0 g。

(3) 微生物菌剂的扩大培养与用量: 将纤维素分解菌在 QHZ-98A 振荡培养箱  $28^\circ\text{C}$  进行扩大培养, 当其 OD 值为 0.5~0.6 (10 倍稀释法) 之间时投加到堆体中, 并确定其活菌数; EM 菌与糖蜜按照 1:1 混合培养, 与纤维素分解菌培养时间相同, 投加到堆体中; 菌剂的投加按照堆料的 10% 为标准, 按照实验设计向堆体中投加微生物菌剂, 其中混合菌以纤维素分解菌: EM 菌 = 1:1 施加。

### 1.4 试验设计

1.4.1 不同微生物组合单因素堆肥试验 本试验共 4 个处理: 处理 1 为 CK; 处理 2 为纤维素分解菌; 处理 3 为 EM 菌; 处理 4 为纤维素分解菌 + EM 菌。

<sup>①</sup>基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2004AA649050)、国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB410809)、国家自然科学基金项目 (40125005、0432005) 和中国科学院知识创新项目 (CXTD-Z2005-4) 资助。

\* 通讯作者 (ymluo@issas.ac.cn)

作者简介: 李宁 (1980—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要从事污染土壤修复植物处置与资源化利用研究。E-mail: ningli@issas.ac.cn

将粉碎后的海州香薷样品 270 g 装入发酵瓶, 加入尿素 3.76 g, 调整堆料的 C/N 到 35, 使各处理堆料的含水率均为 75%, 在温室 (25~37℃) 中进行堆腐, 每处理 3 次重复。

**1.4.2 不同温度、湿度双因素堆肥试验** 本试验共 6 个处理: 处理 1 为模拟温度 (25~55℃, 下同), 湿度 65%; 处理 2 为模拟温度, 湿度 75%; 处理 3 为模拟温度, 湿度 85%; 处理 4 为室温 (25~37℃, 下同), 湿度 65%; 处理 5 为室温, 湿度 75%; 处理 6 为室温, 湿度 85%。将粉碎后的海州香薷样品 270 g 装入发酵瓶, 加入尿素 3.76 g, 调整堆料的 C/N 到 35, 按各处理调整堆料的含水率, 分别在温室和 LRH-250-GS 人工气候箱中培养, 每处理 3 次重复。(注: 模拟温度具体设定为堆肥第 1 天: 25℃, 第 2 天: 35℃, 第 3 天: 45℃, 第 4~6 天: 55℃, 第 7~10 天: 45℃, 第 11~13 天: 35℃, 第 14~15 天: 25℃, 第 16~18 天: 35℃, 第 19~20 天: 45℃, 第 21~30 天: 35℃, 第 31~45 天: 30℃, 第 46~60 天: 25℃; 室温为每日温室温度。)

**1.4.3 取样与测定** 分别在第 5、10、15、25、35、45、60 天取样检测, 同时定期翻堆, 保证通气量; 当堆体水分大量散失, 适时补充水分, 使堆体呈好氧状态, 保证堆体发酵所需的环境条件。

## 1.5 堆肥过程中的参数检测

**1.5.1 温度、含水率的测定** 室温采用温度计测定每天的平均温度, 模拟培养温度采用 LRH-250-GS 人工气候箱人为调节。含水率采用 DG/20-002 台式烘箱 105℃ 烘干称重法测定。

**1.5.2 全 C、全 N、全 P、全 K、全 Cu 的测定** 全 C 采用重铬酸钾容量法 (油浴); 全 N 采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ -蒸馏定 N 法; 全 P 采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ -钼锑抗比色法 (752 紫外光栅分光光度计), 全 K 采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ -火焰光度计法, 全 Cu 采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ -原子吸收分光光度法。

**1.5.3 纤维素分解菌 CFU 的测定** 采用 10 倍稀释平板培养计数法, 取新鲜样品 10 g, 加入到盛有 90 ml 蒸馏水的 250 ml 锥形瓶中, 在 QHZ-98A 全温度振荡培养箱中 28℃、100 r/min 振荡 1 h, 纱布过滤得浸提液, 用移液枪吸取浸出液进行 10 倍稀释, 并在相应的刚果红培养基上涂布, 在 SPX-250C 型恒温恒湿箱 28℃ 培养 48 h 计数。

**1.5.4 数据处理** 采用 SPSS10.0 统计软件进行数据处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同微生物组合对海州香薷堆肥的影响

全 N 作为堆肥中主要营养元素之一, 其含量高低直接影响到有机肥料的肥效。4 个处理的全 N 含量变化曲线如图 1 所示。各处理之间的差异如下: 纤维素分解菌  $P_{1,2} = 0.016$ , EM 菌  $P_{1,3} = 0.001$ , 混合菌剂  $P_{1,4} = 0.000$ , 处理 4 全 N 含量最高为 16.0 g/kg, 说明通过不同微生物之间的协同作用可以有效增加全 N 的含量。各因素对总变异的贡献是混合菌剂 > 纤维素分解菌 > EM 菌, 各处理之间全 N 含量均具有显著差异 (表 1)。但在堆肥过程中, 堆体中的 N 很容易以  $\text{NH}_3$  的形式挥发, 可以通过调整堆体的 pH, 控制堆体温度, 选择有效的添加物料, 接种固 N 微生物, 添加含 Mg 和 P 的化合物有效减少 N 的损失<sup>[4]</sup>。Engracia 等人<sup>[5]</sup>研究了在堆肥底物中加入风化褐煤这种酸性有机物质来固定  $\text{NH}_4^+$ , 以减少  $\text{NH}_3$  的生成, 从而达到减少堆肥过程中 N 损失的目的, 保 N 技术已经成为有机肥料堆腐过程中至关重要的环节。

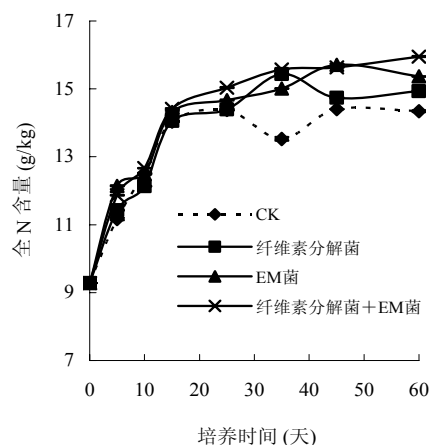


图 1 不同微生物组合堆肥全 N 含量变化曲线

Fig. 1 Total nitrogen dynamics of the composts under different treatment of microbial combination

堆肥过程中全 C ( $F = 2.277$ ,  $P = 0.157$ ) 是反映纤维素降解的重要理化指标, 各处理在发酵过程中全 C 的变化情况如图 2。各处理之间的差异如下: 纤维素分解菌  $P_{1,2} = 0.117$ , EM 菌  $P_{1,3} = 0.517$ , 混合菌剂  $P_{1,4} = 0.045$ 。各因素对总变异的贡献是: 混合菌剂 > 纤维素分解菌 > EM 菌。除处理 1 与处理 4 有显著差异外, 各处理组之间的差异不显著。处理 4 全 C 的含量从最初的 550 g/kg 下降到 280 g/kg, 全 C 变化反映了堆体中纤维素、半纤维素、木质素的降解情况, 说明纤维素分解菌和 EM 菌对它们的降解效果显著 (图 2)。

虽然处理 1 (CK) 可以利用堆料初期存在的微生物群落 (细菌、真菌、放线菌) 进行自然发酵, 完成堆肥过程。但堆肥初期土著微生物量少, 需要一定时

间才能繁殖起来, 且各种微生物对各种物质的分解能力和分解速度不尽相同。通过 60 天的堆腐, 其 C/N 值为 25.1,  $>20$ , 标志着堆肥尚未腐熟。但通过添加微生物菌剂, 可以明显提高初期堆料中微生物总数, 有利于快速分解有机物的有益菌种形成优势群落。从实

验结果可以看出: 投加混合菌剂的处理组堆肥的全 N 含量最高为 16.0 g/kg (图 1), C/N 值为 17.9 (图 3),  $<20$ , 说明堆肥腐熟。这也说明了微生物菌剂对 N 的转化以及堆肥的腐熟起到了不可或缺的作用, 各处理的堆肥品质见表 1。

表 1 不同微生物组合堆肥品质

Table 1 Quality of composts under different treatment of microbial combination

| 处理            | 有机 C (g/kg)      | 全 N (g/kg)        | 全 P (g/kg)        | 全 K (g/kg)        | C/N               |
|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| CK            | 367 $\pm$ 0.7 a  | 14.3 $\pm$ 0.02 c | 2.00 $\pm$ 0.01 a | 6.54 $\pm$ 0.03 c | 25.1 $\pm$ 0.1 a  |
| 纤维素分解菌        | 303 $\pm$ 1.6 ab | 14.9 $\pm$ 0.01 b | 2.22 $\pm$ 0.03 a | 7.10 $\pm$ 0.01 c | 20.3 $\pm$ 1.2 ab |
| EM 菌          | 343 $\pm$ 2.9 ab | 15.4 $\pm$ 0.01 b | 2.51 $\pm$ 0.04 a | 8.71 $\pm$ 0.01 a | 22.3 $\pm$ 2.0 ab |
| 纤维素分解菌 + EM 菌 | 280 $\pm$ 3.9 b  | 16.0 $\pm$ 0.01 a | 2.43 $\pm$ 0.03 a | 7.83 $\pm$ 0.02 b | 17.9 $\pm$ 2.5 b  |

注: 各列中字母不同表明有显著差异 ( $p<0.05$ ), 下同。

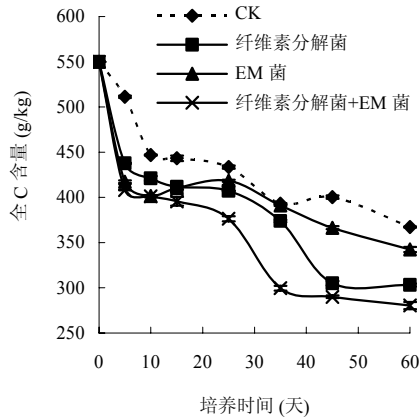


图 2 不同微生物组合堆肥全 C 含量变化曲线

Fig. 2 Total carbon dynamics of the composts under different treatment of microbial combination

通过纤维素分解菌和 EM 菌结合, 依靠微生物的协同作用, 即利用 EM 菌中的多种微生物如酵母菌、放线菌、乳酸菌、固 N 菌、光合菌等复合微生物群的高效分解作用, 迅速将堆料中的糖类、蛋白质、淀粉、脂肪等易分解有机物降解, 释放出能量, 使堆料温度迅速升高, 并使纤维素软化, 为纤维素分解菌提供有利的环境; 同时纤维素分解菌快速降解纤维素等大分子物质成为小分子物质, 可以作为 EM 菌的营养物质。EM 菌、纤维素分解菌形成良好的共代谢关系, 生成复杂而稳定的生态系统, 使堆肥达到腐熟水平。

单一的细菌、真菌、放线菌群体, 无论其活性多高, 在整个发酵过程中都比不上多种微生物群体的共同作用 (表 1)。根据某些微生物之间的协同作用更有利于它们彼此的生长, 从而提高降解有机物质的能力。

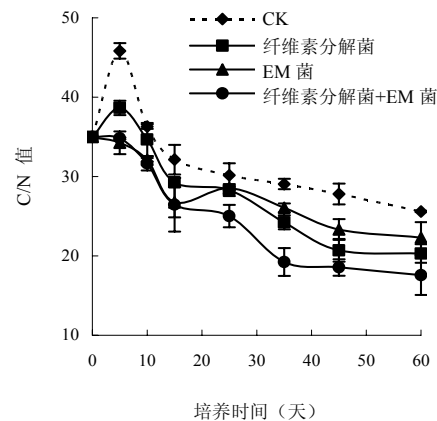


图 3 不同微生物组合堆肥 C/N 变化规律

Fig. 3 C/N ratio dynamics of the composts under different treatment of microbial combination

不同菌株所能产生的酶类和对底物形式的要求各不相同, 对纤维素类、淀粉类、蛋白质类等物质的分解, 必须有多菌株的协同作用来完成。正是由于不同菌株的差异性, 因此进行不同菌株的组合试验, 寻找对环境条件要求宽松、生长繁殖迅速的菌株组合是解决发酵过程中“瓶颈”的所在。

## 2.2 不同温度、湿度对海州香薷堆肥的影响

**2.2.1 堆料中含水率、环境温度的变化** 堆肥过程中的几个重要步骤包括: 调温、控湿、通气、调 C/N。本试验采用控制环境温度以确定制备有机肥料的最佳环境因子, 依据一次发酵期为 0 ~ 25 天, 二次发酵期为 25 ~ 60 天, 设置模拟温度变化范围为 25 ~ 55°C (图 4), 保证杀死病原微生物; 室温处理温度变化范围 25 ~ 37°C, 随室外温度的变化而变化。湿度处理分别为

65%、75%、85%，以此确定堆肥处理的最佳含水率。

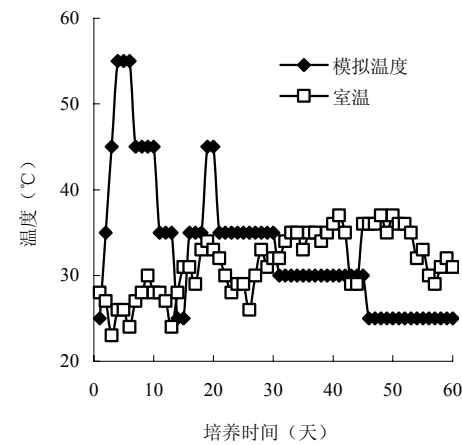


图 4 室温处理、模拟温度处理堆体温度曲线

Fig. 4 Compost temperature dynamics under composting condition

温度是影响有机体生长和存活的重要因素之一，同时又是影响微生物活性的显著因子，对生物发酵反应速度起着决定性作用。温度直接影响微生物的活动及种群组成和数量，并进一步影响有机物的分解速率及腐殖化过程，常常作为微生物生化活动量的宏观指标。一般认为，微生物活性最适温度范围在 35~50℃，而 49~55℃ 微生物多样性达到最大化；>60℃ 时，多样性显著减少。适宜的温度在堆肥中所起的关键作用是毋庸置疑的<sup>[6]</sup>。Wiley 等<sup>[7]</sup>指出城市垃圾堆肥在 60~65℃ 时 CO<sub>2</sub> 产生量最大，有机质分解速度最快。本试验结果表明：环境温度为 25~37℃ 有利于微生物生长繁殖，可以显著提高堆肥的品质（表 2）。堆肥初期，室温处理的含水率均明显高于模拟温度处理的含水率（图 5），这一阶段正是微生物生长的高峰期，影响着最终的堆肥品质，由于最初模拟温度处理较低的含水率，直接导致了 60 天后其腐熟程度的差异（表 2）。

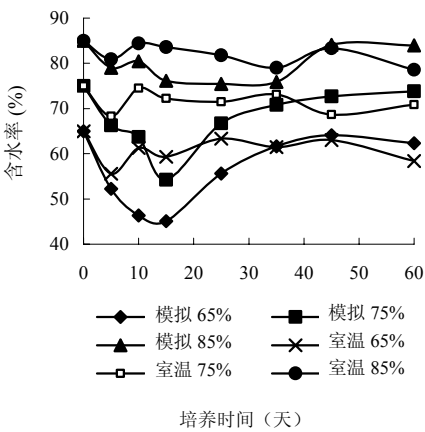


图 5 不同温度、湿度处理堆肥含水率变化规律

Fig. 5 Changes of water content of the compost under different temperature and moisture condition

湿度是影响有机体生长和存活的又一重要因素，堆料中过多的水分占据气体交换的自由空间，使好氧发酵无法进行，影响堆肥温度和分解速度。Wiley 等<sup>[7]</sup>认为 55%~69% 的含水率有利于城市垃圾堆肥温度的升高；金家志等<sup>[8]</sup>认为，70% 的含水率为最佳湿度条件。黄国锋等<sup>[6]</sup>开展的城市垃圾及城市污泥堆肥试验研究发现，水分控制在 60%~70% 为宜。Wong 等<sup>[9]</sup>采用大豆残体和锯末混合堆肥 63 天，湿度为 60%~70%，最终使堆体 C/N 从 30 下降到 18。Heerden 等<sup>[10]</sup>以柑橘废物为原料堆肥 3 个月，湿度为 60%，最终使堆体 C/N 从 24 下降到 7。本试验结果发现无论在室温还是模拟温度条件下，湿度为 75% 的处理，其堆肥品质与其他处理相比具有明显的差异。通过 60 天的堆腐，室温处理和模拟温度处理 C/N 从 35 分别下降到 13.7 和 19.0（表 2）。

**2.2.2 堆肥中全 C、全 N、C/N 的变化** 针对堆肥过程中全 N 的变化，通过 SPSS 方差分析得出温度和湿度因子对堆肥品质的影响：温度为  $F = 21.121$ ， $P =$

表 2 不同处理堆肥品质比较

Table 2 Quality of composts under different composting treatment

| 温度       | 含水率<br>(%) | 全 C<br>(g/kg) | 全 N<br>(g/kg) | 全 P<br>(g/kg)  | 全 K<br>(g/kg)  | C/N          | ηC/N<br>(%)  | 纤维素分解菌<br>(×10 <sup>5</sup> CFU/g 干重) |
|----------|------------|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|--------------|---------------------------------------|
| 模拟<br>温度 | 65         | 343 ± 2 a     | 14.7 ± 0.0 c  | 2.13 ± 0.02 b  | 6.22 ± 0.01 a  | 23.4 ± 0.8 a | 33.3 ± 2.3 c | 2.79                                  |
|          | 75         | 293 ± 0 b     | 15.4 ± 0.0 b  | 2.20 ± 0.01 ab | 6.64 ± 0.01 ab | 19.0 ± 0.3 b | 45.8 ± 0.8 b | 1.03                                  |
|          | 85         | 324 ± 0 ab    | 13.3 ± 0.0 d  | 2.33 ± 0.02 ab | 6.21 ± 0.30 b  | 24.4 ± 0.7 a | 30.1 ± 2.0 c | 0.38                                  |
| 室温       | 65         | 255 ± 1 b     | 15.1 ± 0.0 bc | 2.91 ± 0.02 a  | 6.72 ± 0.01 ab | 20.0 ± 0.7 b | 42.8 ± 2.1 b | 1.13                                  |
|          | 75         | 226 ± 2 c     | 16.5 ± 0.0 a  | 2.71 ± 0.06 ab | 6.24 ± 0.01 a  | 13.7 ± 0.9 c | 60.8 ± 2.4 a | 2.08                                  |
|          | 85         | 354 ± 1 a     | 14.2 ± 0.0 c  | 2.53 ± 0.01 ab | 6.11 ± 0.02 b  | 24.8 ± 0.5 a | 29.1 ± 1.3 c | 0.80                                  |

0.000; 湿度为  $F = 48.934$ ,  $P = 0.000$ 。且当温度为室温、湿度为 75% 时, 全 N 含量最高, 为 16.5 g/kg (图 6), 两因素对总变异的贡献为湿度 > 温度。

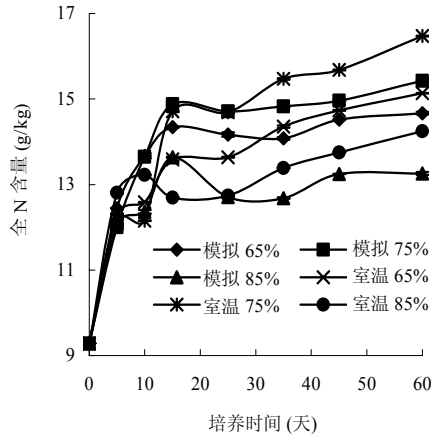


图 6 不同温度、湿度处理堆肥全 N 含量变化曲线  
Fig. 6 Total nitrogen dynamics of the composts under different temperature and moisture conditions

温度和湿度因子对全 C 含量的影响如下: 温度为  $F = 3.524$ ,  $P = 0.081$ ; 湿度为  $F = 12.505$ ,  $P = 0.001$ 。且当温度为室温、湿度为 75% 时, 全 C 含量最低, 为 226 g/kg, 两因素对总变异的贡献为湿度 > 温度。由图 7 可以看出, 随着堆肥时间的延长, 不同堆肥处理全 C 含量都呈下降趋势, 堆肥过程中 C 被不断地分解, 而纤维素的降解与 C 代谢紧密相关, 因此也说明大量的纤维素被微生物降解。比较不同温度处理间堆肥全 C 含量的差异, 说明过高的温度会抑制接种微生物的活性, 降低有机物质的降解速率。

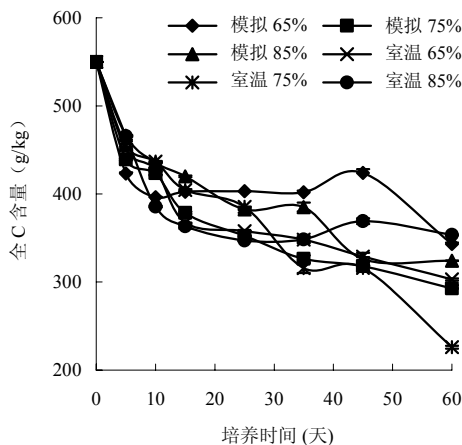


图 7 不同温度、湿度处理堆肥全 C 含量变化曲线  
Fig. 7 Total carbon dynamics of the compost under different treatment and moisture conditions

在温度为室温、湿度为 75% 条件下, 堆肥品质最佳。其全 N 含量为 16.5 g/kg, 全 C 含量为 226 g/kg, C/N 值从 35 下降到 13.7,  $\eta_{C/N}$  为 60.8%, 达到一级腐熟标准<sup>[11]</sup> (图 8、表 2)。除此之外, 环境因子的贡献为湿度 > 温度的结果与 Liang 等<sup>[12]</sup>的结论也是一致的。Liang 等<sup>[12]</sup>以城市污泥和锯末为原料采用不同温度、湿度进行堆肥, 认为湿度在 60%~70% 为最适, 在此范围内, 湿度越大微生物活性越强, 且湿度的影响远远大于温度, 据此他认为可通过改变堆体的湿度来控制温度。但笔者认为, 温度和湿度之间的相互作用及机理有待进一步研究。

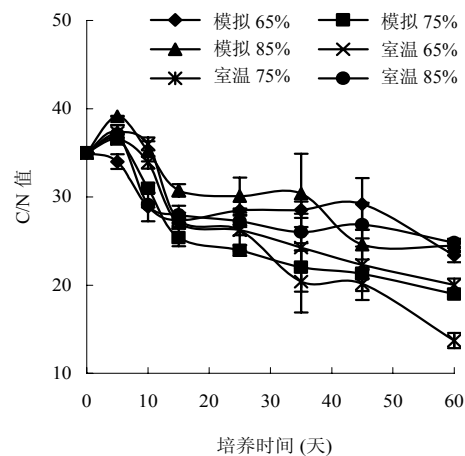


图 8 不同温度、湿度处理堆肥 C/N 变化规律  
Fig. 8 C/N ratio dynamics of the composts under different temperature and moisture conditions

**2.2.3 堆肥腐熟度评价** 腐熟度评价的指标主要有温度、固相 C/N 值, 液相 C/N 值及  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量等。农业上一般采用表观指数来评判肥效, 以“黑、腐、臭”作为有机肥料腐熟的标志。本研究采用表观指数 (由外观法确定) 和 C/N 降解率作为堆肥腐熟的评价指标体系<sup>[13]</sup>。

最适合微生物生长的 C/N 值为 25:1, 若 C/N 值过低则堆肥中的 N 易以  $\text{NH}_3$  形式挥发损失并散发出臭味, 且 C 不足会抑制微生物生长, 降低对有机质的分解作用; 若 C/N 值过高则微生物因缺 N 而生长受阻, 同样会降低有机质的分解速度。实际生产中一般堆肥起始 C/N 以 25:1~35:1 左右为宜<sup>[6]</sup>, 李国学等<sup>[14]</sup>认为当堆肥的 C/N 达到 20 以下时, 堆肥已腐熟, 可直接施用。但 Garcia 等<sup>[15]</sup>认为由于微生物本身的 C/N 在 16 左右, 所以, 堆肥的理论腐熟指标应定在 16 以下。同时, 采取不同的堆肥方式, 可以显著提高堆肥品质。Singh 等<sup>[16]</sup>采用两段法进行稻草堆肥: 第一阶段投加微

生物菌剂堆腐 40 天, 第二阶段利用蚯蚓堆肥使得 C/N 从 43.6 下降到 12.8, 使堆肥肥效明显提高。

本试验采用初始 C/N 为 35:1。根据钱学玲<sup>[11]</sup>堆肥腐熟指标体系, C/N 无论以 20, 还是 16 以下为标准, 处理 5 的 C/N 值下降到 13.7,  $\eta_{C/N}$  为 60.8%, 达到一级腐熟标准; 处理 6 为三级基本腐熟, 其余为二级较好腐熟 (表 2)。

**2.2.4 堆肥过程中纤维素分解菌的动态变化** 海州香薷体内 Cu 形态主要有以下 3 种: ①醇溶性蛋白质 (不溶于水) 为主及少量无机盐、氨基酸盐等; ②碱溶性蛋白质的结合态、残余蛋白质和多糖结合态; ③细胞壁上纤维素、木质素和非活性部分相结合。而游离态金属离子及与水溶性物质相结合的部分, 如水溶性有机酸盐等仅占总 Cu 的 1% 左右<sup>[17]</sup>。本试验海州香薷总 Cu 430 mg/kg, 所以游离态的 Cu 约为 4.30 mg/kg 左右, 那么在理论上, 通过实验筛选出的纤维素分解菌具有抗 Cu (10 mg/kg) 和分解纤维素的特性, 可作为目标菌种施用。在试验中, 通过刚果红选择培养基对其进行定量检验。

微生物发酵堆肥是由群落结构演替非常迅速的多个微生物群体共同作用而实现的动态过程。在该过程中每一个微生物群体都有在相对较短的时间内适合自身生长繁殖的环境条件, 并且对某一种或某一特定的有机物质的分解起作用<sup>[18]</sup>。因此, 本实验仅将接种微生物菌剂中的纤维素分解菌作为研究的重点, 其种群动态变化见图 9。

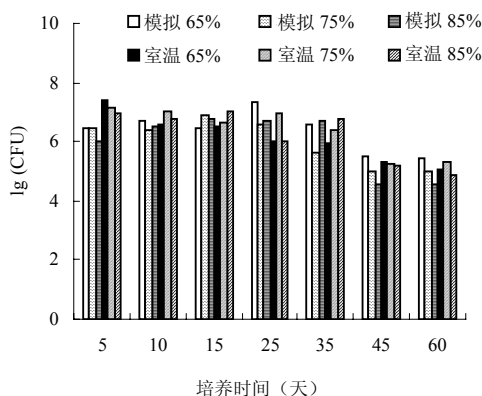


图 9 不同温度、湿度处理堆肥过程中纤维素分解菌 CFU 的动态变化

Fig. 9 Cellulose utilization microorganisms CFU dynamics during composting period under Different temperature and moisture conditions

当温度上升到 40℃ 左右, 常温菌生长受到抑制, 嗜温细菌缓慢增长繁殖; 当温度在 55℃ 时, 嗜温菌生

长受到抑制, 嗜热菌开始活跃; 当环境温度控制在 45~55℃ 条件下, 其菌群密度明显低于室温处理, 说明过高的环境温度不利于微生物的生长代谢。而在堆肥腐熟后期, 模拟温度处理菌群密度略高于室温处理, 最高可达  $2.79 \times 10^5$  CFU/g 干重。同时, 堆体中伴生放线菌, 在堆肥的表面肉眼可见, 放线菌虽然很少利用纤维素, 但它们能利用半纤维素, 并能在一定程度上改变木质素的分子结构, 继而分解溶解的木质素。

### 3 小结

(1) 在不同微生物组合处理过程中, 各处理全 N 呈上升趋势, 全 C 呈明显的下降趋势, 以混合菌剂效果最为明显, 混合菌剂 C/N 值变化最大, 从最初的 35 下降为 17.9, 达到腐熟标准。

(2) 在温度、湿度双因素处理的堆肥过程中, 各处理全 N 呈上升趋势、全 C 呈明显的下降趋势。室温的堆肥品质明显高于模拟温度处理。室温、含水率为 75% 处理堆肥品质明显高于其他处理, 其 C/N 值为 13.7,  $\eta_{C/N}$  为 60.8%, 达到一级腐熟标准; 室温、含水率为 85% 处理为三级基本腐熟; 其余处理为二级较好腐熟。环境因子的贡献为湿度 > 温度。

(3) 堆肥制作过程中, 纤维素分解菌和 EM 菌的复合菌剂增加了微生物菌群密度, 提高了菌群质量, 并维持在相对稳定的较高水平之上, 最高达  $2.79 \times 10^5$  CFU/g 干重, 以纤维素、半纤维素等物质为底物, 使其大量降解。因此, 复合菌剂是影响堆肥品质的又一重要因素。

(4) 在以海州香薷为原料的好氧堆肥过程中, 向堆体中接种纤维素分解菌和 EM 菌的复合菌剂, 环境温度变化范围为 25~37℃、湿度为 75% 的环境条件, 为最佳组合条件, 使堆料中纤维素的降解程度显著提高, 并有效改善堆肥最终产物的理化性质, 加快堆肥进程。

### 参考文献:

- [1] Tuomela M, Vikman M, Hatakka A, Itävaara M. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresource Technology*, 2000, 72: 169-183
- [2] 席北斗, 刘鸿亮, 白庆中, 黄国和, 曾光明, 李英军. 堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3 (3): 19-23
- [3] 黄得扬, 陆文静, 王洪涛. 有机固体废物堆肥化处理的微生物学机理研究. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5 (1): 12-18
- [4] Zhu NW, Deng CY, Xiong YZ, Qian HY. Performance characteristics of three aeration systems in the swine manure composting. *Bioresource Technology*, 2004, 95: 319-326

- [5] Madejón E, Díaz MJ, López R, Cabrera F. Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Bioresource Technology*, 2001, 76: 275–278
- [6] 黄国锋, 吴启堂, 黄焕忠. 有机固体废弃物好氧高温堆肥化处理技术. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 159–161
- [7] Wilcy JS, Pierce GW. A preliminary study of high rate composting. *Proceedings of the American Society for Civil Engineering*, 1955, 81: 1–28
- [8] 金家志, 邵凤君, 陆华. 肉鸡舍垫料堆肥化处理研究. *农业环境保护*, 1997, 16 (2): 65–67
- [9] Wong JWC, Mak K, Chan N, Lam A, Fang M, Zhou L, Wu Q, Liao X. Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. *Bioresource Technology*, 2001, 76: 99–106
- [10] van Heerden I, Cronjé C, Swart SH, Kotzé JM. Microbial chemical and physical aspects of citrus waste composting. *Bioresource Technology*, 2002, 81: 71–76
- [11] 钱学玲, 孙义. 模糊综合评价法判别堆肥腐熟度研究. *上海环境科学*, 2001, 20 (2): 85–89
- [12] Liang C, Das KC, McClendon RW. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 2000, 86: 131–137
- [13] 张松林, 魏霞, 何建华. 利用酵素菌剂堆肥推广技术. *农业科技通讯*, 2000 (12): 25
- [14] 李国学, 黄懿梅, 姜华. 不同堆肥材料及引入外源微生物对高温堆肥腐熟度影响的研究. *应用与环境生物学报*, 1999(增刊): 139–142
- [15] García C, Hernández T, Costa F, Ayuso M. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 23: 1501–1512
- [16] Singh A, Sharma S. Composting of a crop residue through treatment with microorganisms and subsequent vermin-composting. *Bioresource Technology*, 2002, 85: 107–111
- [17] 唐世荣. 重金属在海州香薷和鸭跖草叶片提取物中的分配. *植物生理学通讯*, 2000, 36 (2): 128–129
- [18] Baddi GA, Albuquerque JA, Gonzalez J, Cegarra J, Hafidi M. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of olive mill wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2004, 54: 39–44

## Quality and Substance Change of *Elsholtzia Splendens* Compost as Affected by Different Environmental Factors

LI Ning<sup>1,2</sup>, WU Long-hua<sup>1</sup>, LI Fa-yun<sup>2</sup>, LUO Yong-ming<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

<sup>2</sup> College of Resources and Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China )

**Abstract:** Taking the copper accumulator plant *Elsholtzia Splendens* as the raw material for composting, inoculated with the microorganism agent (mixed with cellulose utilization microorganisms and EMs), researches on different combination of microbes and environmental factors were conducted. Results indicated that during the composting period, water content of all the treatments descended dramatically. Total organic carbon decreased obviously, but total nitrogen concentration significantly increased. Mixed microbe agent paid much contribution to the quality of the product, making the C/N to 17.9. While concerning the outdoor temperature, 75% water content treatment produced good compost, making the C/N to 13.7, and the  $\eta_{CN}$  was about 60.8%, which met the standard of first level. Meanwhile, through the whole procedure, cellulose utilization microorganisms kept a vigorous ability to breakdown the cellulose, the microbe density sustained at nearly  $2.79 \times 10^5$  CFU/g (dry weight). By means of the effect of cooperation of microorganisms, the *Elsholtzia splendens* plant was composted quickly.

**Key words:** Cellulose utilization microorganisms, EM (effective microorganisms), Composting, *Elsholtzia Splendens*